



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**  
**Programa de Pós-Graduação em**  
**Engenharia Elétrica - Departamento da**  
**Engenharia Elétrica**

**CARLOS ROBERTO CHAVES**

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DO PROCESSO DE**  
**COMBUSTÃO EM FORNOS PETROQUÍMICOS VOLTADA**  
**PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Curitiba

2012

CARLOS ROBERTO CHAVES

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DO PROCESSO DE COMBUSTÃO EM  
FORNOS PETROQUÍMICOS VOLTADA PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA  
ENERGÉTICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. José Manoel Fernandes, PhD,

Co-orientador: Profº Edson José Joaquim de Souza, Dr.

Curitiba

2012

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

Carlos Roberto Chaves

### **ANÁLISE DE DESEMPENHO DO PROCESSO DE COMBUSTÃO EM FORNOS PETROQUÍMICOS VOLTADA PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovado em:

---

Prof. PhD. Orientador José Manoel Fernandes  
Instituição: Universidade Federal do Paraná

---

Prof. Dr. Gideon Villar Leandro  
Instituição: Universidade Federal do Paraná

---

Prof. Dr. Dr. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara  
Instituição: Universidade Federal do Paraná

---

Prof. Dr. Edson José Joaquim de Souza  
Instituição: Petrobras/Cenpes

## **AGRADECIMENTOS**

Em especial aos professores José Manoel Fernandes - PhD, Gideon Villar Leandro - Dr. Gustavo Henrique da Costa Oliveira - Dr., do departamento de Elétrica / UFPR – pela orientação, ensinamentos, incentivo para conclusão do mestrado e principalmente pela simplicidade e bom humor durante as tratativas e interlocuções que se fizeram necessárias. Ao colega Prof. Edson José Joaquim de Souza – Dr. – Petrobras/ SIX/ Cenpes, pela grande oportunidade no compartilhamento de conhecimento sobre sistemas térmicos.

Meus agradecimentos pelo colega Eng<sup>o</sup> Gustavo Nunes (Gerência de Otimização de Processos) e Erasto Gaertner, Supervisor do Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento da Petrobras, sempre solícito e atencioso. A todos os professores e coordenação do departamento de engenharia elétrica do curso de Pós-Graduação, pelos conhecimentos transmitidos. Ao Eloy Zeni Junior, Gerente de TIC – Petrobras, pela oportunidade e visão estratégica no desenvolvimento de empregados em sistema e conhecimento estratégico. Aos amigos Pedro Silvino e Simon Levnhagen, pelo incentivo apoio incondicional. A secretária Maria Raquel Forte, pela simpatia e atenção durante todo o período de formação. Agradeço a Deus por ser bem sucedido na arte de obter grandes amigos.

À minha esposa, pelo apoio incondicional durante toda a minha jornada na academia.

**Eliane Carla Stucki**

A minha mãe, razão de minha existência.

**Zélia Maria Chaves**

As minhas filhas, amor eterno, motivação vencer desafios,

**Karoline Eleno Chaves, Karen Eleno Chaves.**

Aos meus irmãos, pelos momentos mais felizes de nossas infâncias.

**Marcos Tieres Chaves, Marcio de Oliveira Chaves e Leila de Oliveira Chaves.**

In memory

Ao meu pai, pelos ensinamentos, companheirismo e pelo exemplo de vida.

“A fructibus eorum cognoscetis eos.”

**Gercino de Oliveira Chaves**



"Tenha em mente que tudo que você aprende na escola é trabalho de muitas gerações. Receba essa herança, honre-a, acrescente a ela e, um dia, fielmente, deposite-a nas mãos de seus filhos".  
(Albert Einstein).

## RESUMO

Neste trabalho, um referencial teórico foi realizado para o desenvolvimento de estratégias de controle em fornos petroquímicos visando a melhoria da eficiência energética de acordo com o cenário e com as funções restritivas. Desta forma este trabalho está inserido dentro do contexto de controle automático do processo de combustão em fornos e contém uma nova abordagem para a análise da eficiência energética, sendo esta uma das principais contribuições para sua aplicação prática e acadêmica. Como estudo de caso, um forno petroquímico real foi utilizado. Este forno possui similaridade construtiva e operacional em relação a diversos reatores de carga de unidades de craqueamento catalítico presentes no país. O propósito do forno no processo petroquímico, é fornecer energia térmica e/ou calor para o gás de processo a uma temperatura pré-definida, a fim de contribuir para a reação em um reator de carga (retorta). A busca pela melhoria da eficiência energética e/ou aumento do rendimento produtivo deve ser perseguida dentro do contexto da sustentabilidade de um processo desta natureza. O aumento da demanda de consumo de derivados, impõe um cenário desafiador, o qual reflete no aumento do tempo de operação (campanha) das unidades produtivas, e atendimento da legislação ambiental em relação a emissão de poluentes, é a motivação para o investimento em projetos cuja primícia é a melhoria da eficiência energética em equipamentos térmicos. Este é o objetivo deste trabalho, discorrer sobre maneiras de se chegar nesta melhoria.

**Palavras-chave:** Análise. Forno. Petroquímico. Controle. Eficiência Energética.



## ABSTRACT

This work aims to analyze the energy efficiency of a petrochemical furnace which is the subject of study of this dissertation. It is of paramount importance to emphasize that this study will serve as a theoretical framework for the development of control strategies in petrochemical furnaces to improve energy efficiency in accordance with the scenario and restrictive functions. It is believed that this work could add within the context of automatic control of combustion in furnaces, a new approach to the analysis of energy efficiency, which is a major contribution to the academic and practical justification for the choice of the oven petrochemical Petrosix process, in particular, is due to the similarity constructive and operating in relation to Reactors load catalytic cracking units, etc. The kiln F-23001 is designed to produce about 34.2 million Kcal / h, from combustion of oil and / or fuel gas. The purpose of the oven in the petrochemical process, and provide power thermal and / or heat to the process gas to a preset temperature in order to contribute to the reaction in one reactor load (retort). Among the main objectives of this work is essential to mention that the ecological bias is part of the objective function. The quest for improved energy efficiency and / or increase the productive yield, must pursued within the context of sustainability and the maintenance of ecological balance (decrease of atmospheric pollutants). The increasing consumer demand for derivatives, requires a challenging scenario, which reflects the increase in operating time (year) of production units, and compliance with environmental legislation regarding the emission of pollutants, this is undoubtedly the motivation for investment in projects whose pricier is to improve the thermal efficiency energetic in equipment.

**Keywords:** Analysis. Oven. Petrochemicals. Control. Energy Efficiency.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 – Forno petroquímico, complexo de refino de petróleo .....	25
Figura 2-2 – Forno petroquímico típico construtivo horizontal, posição do feixe de tubos da radiação e convecção .....	27
Figura 2-3 – Tubo de radiação, deposição de particulado, devido a regiões de baixa velocidade, efeito camada limite (velocidade) .....	28
Figura 2-4 – Forno vertical, área reduzida em função da disposição dos tubos de radiação.....	29
Figura 2-5 – Estrutura física representativa de um forno, disposição da câmara de combustão de um forno petroquímico com o respectivo conjunto de feixes tubulares da região de radiação.....	30
Figura 2-6 – Forno: câmara combustão, câmara radiação, convecção duto de alimentação, duto de descarga, duto de interligação .....	32
Figura 2-7 – Câmara radiação do forno industrial, região de radiação com coloração rubra (cor laranja) em função da temperatura, situada em torno dos 1200 °C.....	33
Figura 2-8 – Circuito do pré-aquecedor de ar para o mecanismo de combustão do forno .....	34
Figura 2-9 – Diagrama de blocos funcionais do forno .....	35
Figura 2-10 – Detalhe construtivo do termopar, utilizado para medição de temperatura do gás de processo.....	37
Figura 2-11 – Fluxograma do circuito de aquecimento do gás de processo com a malha de controle de temperatura.....	37
Figura 2-12 – Malha de controle de óleo e gás combustível .....	38
Figura 2-13 – Malha de controle de vazão de ar para combustão em razão da quantidade estequiométrica de combustíveis, mestre na cor vermelha .....	41
Figura 2-14 – Diagrama de blocos do controlador PID .....	44
Figura 2-15 – Fluxograma funcional do SDCD ABB, documento de visão dos blocos funcionais, objetos dinâmicos pertencentes à estratégia de controle.....	45
Figura 2-16 – Transmissor de pressão diferencial, utilizado para medição de vazão volumétrica.....	47
Figura 2-17 – Transmissor de pressão diferencial, medição de vazão. ....	48

Figura 2-18 – Representação esquemática do sensor capacitivo utilizado por fabricantes de instrumentos de medição .....	49
Figura 2-19 – Diagrama de blocos de funcionalidades do transmissor de pressão diferencial. ....	50
Figura 2-20 – Medidor mássico coriolis, estrutura interna, bobinas de excitação para modo de vibração dos tubos e bobina sensores de detecção de defasagem .....	51
Figura 2-21 – Válvula de controle, elemento final de controle de processo. ....	53
Figura 2-22 – Conjugado motor e soprador de ar atmosférico para processo de combustão e produção de energia térmica .....	54
Figura 2-23 – Queimador de forno industrial petroquímico .....	56
Figura 2-24 – Sensor de Chama, dispositivo do sistema de proteção de chama, intertravamento de segurança e acendimento do sistema de combustão.....	58
Figura 2-25 – Maçarico principal de queima de óleo e gás combustível, deterioração e deposição de particulado (carbono) em função de problemas com a combustão, queima incompleta .....	59
Figura 3-1 – Diagrama de blocos de um controlador PID com realimentação negativa .....	63
Figura 3-2 – Operação de União entre subconjuntos Fuzzy .....	67
Figura 3-3 – Variável temperatura, conceito de variável Linguística .....	69
Figura 3-4 – Os principais tipos de técnicas de Defuzzyficação: Centróide, First-of-Maxima, Middle-of-Maxima e Critério Máximo. ....	72
Figura 3-5 – Estrutura básica do controlador Fuzzy .....	73
Figura 3-6 – Diagrama de Blocos, representação das variáveis do processo de geração de energia térmica.....	76
Figura 3-7 – Diagrama de blocos da planta com as respectivas variáveis de saída de entrada do processo de geração de energia térmica .....	76
Figura 3-8 – Controlador Fuzzy, desenvolvido para controle de nível,sistema de segunda ordem .....	78
Figura 3-9 – Resposta da Planta em malha fechada a mudança de referência Utilizando o PID1, PID2 com Método Fuzzy.....	79
Figura 3-10 – Diagrama de blocos do sistema de controle Fuzzy de demanda termica para fornos cerâmico.....	81
Figura 3-11 – Resposta do processo térmico em relação as variações de carga e set-point .....	82

Figura 3-12 – Fluxograma de processo de uma Caldeira (Água-tubular), com as respectivas malhas de controle de vazão de vapor e água de alimentação do tubulão superior .....	86
Figura 3-13 – Preditor de Smith para sistema de controle discreto.....	87
Figura 3-14 – Diagrama de blocos do sistema de controle com a respectiva equação de síntese do preditor de Smith, diminuição do atraso de transporte.....	88
Figura 3-15 – Controlador Fuzzy imunológico, simulado no Matlab.....	90
Figura 3-16 – Estrutura funcional do Controlador MPC.....	92
Figura 3-17 – Horizonte de previsão do controlador preditivo.....	92
Figura 3-18 – Estrutura do Controlador GPC .....	96
Figura 3-19 – Abordagem Mean Level Control.....	97
Figura 4-0 – Observa-se no gráfico uma grande variação da carga térmica do Forno ao longo do período de campanha.....	112
Figura 4-1 – Comportamento da malha de controle de temperatura do gás de processo, malha em modo automático.....	114
Figura 4-2 – Identificação da função de transferência do processo, método Ziegler Nichols, malha aberta.....	116
Figura 4-3 – Processo de identificação com malha de vazão de gás combustível. Aplicando degrau na malha de vazão de gás combustível .....	117
Figura 4-4 – Resposta da válvula de controle de vazão de gás em relação ao estímulo aplicado na malha de controle para identificação da função de transferência do processo.....	118
Figura 4-5 – Resposta da válvula de controle de vazão de gás em relação ao estímulo aplicado na malha de controle para identificação da função de transferência do processo.....	118
Figura 4-6 – Resposta da temperatura do gás de processo na saída do forno, tempo morto de 8 segundos, constante de tempo 11,3 segundos.....	119
Figura 4-7 – Modo de operação do controlador de temperatura do gás de processo, período longos em modo manual .....	120
Figura 5-0 – Elementos finais de controle, motor elétrico dumper .....	126
Figura 5-1 – Controlador Difuso Adaptativo para Sistema Térmico (CDAST) .....	131

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 – Propriedades e Conjuntos Fuzzy .....	68
Tabela 3-2 – Comparação entre algoritmos genéticos e o sistema natural.....	90
Tabela 3-3 – Aplicações Comerciais de <i>MPC</i> .....	93
Tabela 4-0 – Carga Térmica do Forno .....	110
Tabela 5-0 Regras do Motor de Inferência.....	131

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIC	Controlador e Indicador de Vazão de Ar
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
eAB (T)	Diferença de potencial gerada em um termoelemento
eAC (T)	Diferença de potencial gerada entre dois termoelemento
eBC (T)	Diferença de potencial gerada em um termoelemento
FCC	Craqueamento Catalítico em Leito Fluidizado
FIC	Controlador e Indicador de Vazão ou Fluxo
Gp	Ganho de processo
HCC	Hidro craqueamento Catalítico
HTD	Unidade de tratamento
I/O	Output Input (Saída, Entrada)
ISI	<i>Inter Symbol Interference</i>
Kp	Ganho de processo
LIC	Controlador e Indicador de Nível
MFP	Multi Function Process
MGC	Massa de gás combustível
Moc	Massa de óleo combustível
MV	Variável Manipulada
Nox	Número de oxidação
NR	<i>Norma Regulamentadora</i>
O2	Oxigênio
PEAD	Polietileno de Alta Densidade, EG – Etileno Glicol
PELBD	Polietileno de Baixa Densidade
PES	Equipamento de Segurança de Processo
PIC	Controlador e Indicador de Pressão
PTA	Produção Ácido Treftálico Purificado (poliéster)
PRONAR	Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar
PV	Process Variable ou variável de processo
RQ	<i>Reciclo Quente</i>

SDCD	Sistema Digital de Controle Distribuído
SISO	Single Input Single Output
T	Constante de tempo
TIC	Controlador e indicador de Temperatura
TG1, TG2 e TG3	Transferência de energia térmica da convecção radiação
$T_R$	Temperatura de referência
$U_v$	Tensão gerada no termoelemento
$V_r$	Velocidade num sistema rotacional
$\omega$	Velocidade angular

## LISTA SÍMBOLOS

$v$	Velocidade de escoamento fase liquidar [m/s]
$\Delta$	Diferença relativa de pressão
$\lambda$	Comprimento de onda da luz que propaga através da fibra óptica [nm]
KW	Medida de potencia, energia calorífera



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>2 O SISTEMA FÍSICO .....</b>	<b>23</b>
2.1 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DOS FORNOS PETROQUÍMICOS .....	24
2.1.1 Dispositivos do Sistema de Controle de Combustão .....	31
2.1.2 Controle Regulatório de Temperatura do Gás de Processo.....	36
2.1.3 Malha de Controle de Excesso de Ar.....	39
2.1.4 Critério de Seleção de Combustíveis .....	42
2.1.5 Sistema de Digital de Controle Distribuído .....	43
2.1.6 Instrumentação de Campo .....	46
2.1.7 Elemento Final Controle .....	51
2.1.8 Elemento Primário.....	54
2.1.9 Sequenciamento da Operação do Forno: acendimento e sistema de proteção de chama do processo de combustão .....	55
<b>3 ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>60</b>
3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	60
3.1.1 Controle Regulatório PID para Processo de Combustão de Fornos e Caldeiras .....	62
3.1.2 Fundamentação da Lógica Fuzzy .....	65
3.1.3 Teoria de Conjuntos Fuzzy .....	66
3.1.4 Teoria de Conjuntos Fuzzy Regras Linguísticas Fuzzyficação.....	69
3.1.5 Motor de Inferência Fuzzy .....	70
3.1.6 Método de Defuzzyficação.....	72
3.1.7 Modelo Básico Controlador Fuzzy.....	73
3.1.8 Sintonia de Parâmetros de Controladores PID Fuzzy .....	74
3.1.9 Controle Regulatório PID Fuzzy.....	75
3.1.10 Estratégias de Controle Preditivo .....	90
3.1.11 Controle Preditivo MPC .....	92
3.1.12 Controle Preditivo DMC .....	94
3.1.13 Controle Preditivo Generalizado (GPC).....	95
3.1.14 Estratégias de Controle Preditivo Aplicado a Processos Térmicos .....	100
3.1.15 Considerações.....	103

<b>4 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO FORNO PETROQUÍMICO.....</b>	<b>106</b>
4.1 METODOLOGIA.....	107
4.2 EFICIÊNCIA TÉRMICA DO FORNO.....	109
4.3 COMPORTAMENTO DINÂMICO DO FORNO.....	113
4.4 IDENTIFICAÇÃO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO FORNO .....	114
4.5 CONSIDERAÇÕES.....	121
<b>5 ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>123</b>
5.1 DESEMPENHO DA MALHA DE TEMPERATURA DO FORNO .....	123
5.2 CONTROLADOR DIFUSO PID ADAPTATIVO PARA SISTEMA TÉRMICO....	128
5.3 CONSIDERAÇÕES.....	132
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>133</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>135</b>
<b>ANEXO A – Lista de Publicações.....</b>	<b>146</b>
<b>ANEXO B – Artigo sobre MPC apresentado na VI Congresso Rio Automação 2011 .....</b>	<b>147</b>
<b>ANEXO C – Artigo sobre MPC apresentado na ISA International USA 2011...</b>	<b>164</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O petróleo configura-se como uma fonte de energia, inserido no contexto da matriz energética de um país, e representa 90% da energia consumida na grande maioria dos continentes (RODRIGUES, 2000).

A exploração, produção e distribuição de derivados de petróleo (gás, óleo diesel, nafta, etc.) são em grande parte responsáveis pela movimentação da economia mundial. Durante muitas décadas, o petróleo foi o grande propulsor da economia internacional, chegando a representar, no início dos anos 70, quase 50% do consumo mundial de energia primária (CHAUPRADE, 2003).

Para obtenção dos derivados de petróleo, faz necessário o fornecimento de energia térmica a óleo cru (petróleo), para posterior processamento em unidades de destilação e craqueamento (quebra das ligações dos elementos da cadeia de carbono) (SOUZA, 2008). O conjunto de unidades responsáveis pela transformação do petróleo bruto em combustíveis e insumos para indústria petroquímica é chamada de refinaria.

No processo de refino, a demanda térmica é expressiva. A energia térmica fornecida ao processo é utilizada para promover a <sup>1</sup>mudança de fase e/ou de estado do petróleo bruto (fase líquida para fase gasosa), para o processo de destilação dos compostos da cadeia de carbono. Na grande maioria dos processos de reação térmica, é necessária a utilização de equipamentos (fornos petroquímicos) que promovem a liberação de energia térmica. Estes fornos petroquímicos são de grande porte e movimentam grandes volumes de combustível e de gás de processo, e por isso demandam constantemente, atenção e controle em relação ao seu desempenho.

O forno cumpre papel importante dentro da cadeia do refinamento e processamento de derivados de petróleo, sendo um dos principais equipamentos térmicos na indústria de petróleo uma vez que contribui para o processo de

---

<sup>1</sup> Fases ou estados da matéria - são conjuntos de configurações que objetos macroscópicos podem apresentar. O estado físico tem a relação com a velocidade do movimento das partículas de uma determinada substância. Canonicamente e segundo o meio em que foram estudados, são três os estados ou fases considerados: sólido, líquido e gasoso (BRADY, 1986).

conversão de estado da matéria responsável pela geração de energia térmica para o processo (SOUZA, 2008).

Todo forno petroquímico de grande porte possui uma chaminé onde são conduzidos os fumos da combustão e/ou gases do processo de combustão. Neste momento faz necessária uma breve contextualização a respeito da legislação que versa o tema de emissão atmosférica, conforme disposto na Resolução CONAMA nº05, de 15 de junho de 1989 que estabelece o programa nacional de controle da poluição do ar (PRONAR). Este programa considera os altos níveis de poluição atmosféricos já alcançados, principalmente nas regiões metropolitanas, e seus reflexos negativos sobre a saúde, o meio ambiente e a economia. Outro fator preponderante para a realização deste programa é a crescente industrialização de várias regiões do país com o conseqüente aumento do nível de emissões atmosféricas e da degradação da qualidade do ar.

No texto da resolução, é evidenciada a necessidade de compatibilização do desenvolvimento econômico-social com a preservação da qualidade do meio ambiente e do equilíbrio ecológico.

O compromisso com o desenvolvimento sustentável deve ser considerado como um fator importante e de sucesso para o processo produtivo. Em se tratando de desenvolvimento de sistemas de controle para combustão, aplicados em equipamentos de geração de energia térmica (Caldeiras e Fornos), tais estratégias deverão contemplar a restrição de emissão atmosférica de maneira a garantir a melhor eficiência energética com aderente ao processo de sustentabilidade ecológica (SOUZA, 2008).

Segundo (HORDESKI, 2005) o conceito eficiência energética pode ser definido como a obtenção de serviços energéticos por unidade de energia utilizada, como gás natural, carvão, petróleo ou eletricidade, dentro das quantidades necessárias para produzir um determinado consumível. Devido a grande importância do assunto em decorrência da escassez de recursos energéticos o tópico eficiência energética está presente dentre as diversas ações relacionadas com o desenvolvimento de mecanismos e sistemas racionais de controle de energia.

Com base na necessidade de criar políticas de conservação de energia, o tema eficiência energética passou a fazer parte da agenda mundial, tendo como fator motivador a preocupação dos chefes do grupo de países desenvolvidos e emergentes em relação à elevação dos preços do petróleo a partir da década de

setenta. Durante este período, evidenciou-se que a utilização das reservas de recursos fósseis teria custos crescentes, seja do ponto de vista econômico, seja do ponto de vista ambiental.

A conscientização e formulação de leis rigorosas em relação à conservação de energia, desperta no seguimento empresarial o reconhecimento, que é possível realizar a transformação de matéria prima com o menor gasto de energia e, conseqüentemente, com menores impactos econômicos, ambientais, sociais e culturais (HORDESKI, 2005).

Em se tratando de eficiência energética, o processo de refino de petróleo tem muito a contribuir com a redução de consumo de energia térmica e conseqüentemente, com a diminuição das emissões atmosféricas, seja através do desenvolvimento de metodologias e de sistemas de controle com previsibilidade que assegure uma estabilidade do processo.

Portanto, de acordo com o explicitado nos parágrafos das seções anteriores, o processo de obtenção de derivados de petróleo, demanda uma grande quantidade de energia térmica, onde é possível identificar oportunidades de melhoria no desempenho da eficiência térmica e conseqüentemente na rentabilidade econômica e sustentabilidade ambiental.

## **Motivação**

O controle automático do mecanismo ou sistema de combustão de fornos petroquímicos, de maneira geral, é projetado com o objetivo de manter a variável temperatura do gás de processo, relação estequiométrica entre combustível e oxigênio (comburente) e, principalmente, a manutenção da controlabilidade operacional e ambiental em conformidade com os limites preconizados pela legislação do órgão regulador CONAMA (BRASIL, 1990, 1981).

Segundo Guimarães (2006) “aproximadamente 80% das malhas de controle em operação aumentam a variabilidade em vez de reduzi-la como seria esperado”, esta afirmação esta baseada nas condições do sistema de controle, ou seja, os dispositivos de campo (sensores, transmissores, válvulas de controle) apresentam baixo desempenho em função de folgas, atrito e histerese, etc.

## Objetivos

Neste contexto este trabalho terá como objetivo a avaliação da eficiência energética de um forno petroquímico, objeto de estudo. Em primeira instancia pretende-se propor uma <sup>2</sup>estratégia de controle de automático para o sistema de combustão que propicie resultados satisfatórios em relação à manutenção da estabilidade do processo de troca térmica entre o gás de processo e sistema de radiação e convecção do forno, diminuição da emissão atmosférica em cumprimento as diretrizes da legislação ambiental e elevação da rentabilidade macro econômica.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

1. Investigar a eficiência energética do forno petroquímico;
2. Avaliar a instrumentação de campo quanto ao desempenho de controle, propor adequação dos dispositivos de campo (quando necessário), avaliar os procedimentos operacionais relacionados ao controle do sistema de combustão, propor uma nova metodologia para o sistema de controle de combustão com base no equilíbrio energético e ecológico;
3. Propor uma nova metodologia de controle para o mecanismo e/ou sistema de combustão com base no estado da arte;

## Principais contribuições

A contribuição principal deste trabalho é a proposta de uma estratégia de controle de eficiência energética que propicie o melhor rendimento de transferência de calor com o mínimo de combustível a ser queimado, mantendo o teor de emissão atmosférica abaixo dos valores estabelecidos pela legislação ambiental e programa nacional de qualidade do ar (PRONAR), desenvolvimento sustentável. Outra contribuição é a aplicação desta nova abordagem de controle em equipamentos com sistema de combustão, como geradores de vapor (Caldeiras). É pertinente destacar

---

<sup>2</sup>Estratégia segundo Mintzberg (1973) trata-se da “Forma de pensar no futuro, integrada no processo decisório, com base em um procedimento formalizado e articulador de resultados”. Segundo Ribeiro (2008), o conceito clássica de estratégia de controle é definido como uma determinada função e topologia de interligação de diversos instrumentos e/ou dispositivos com o objetivo de atender a necessidade de um determinado processo.

que, foi publicado artigo em revista e congresso nacional e internacional (USA), sobre trabalho desenvolvido na área de controle preditivo com tema: Análise da Implementação Industrial de MPC em Ambientes Single-loop (ANEXO A). Este trabalho teve como objetivo principal a avaliação de desempenho de um controlador Preditivo comercial, operando em malha fechada SISO (Single-Input, Single Output). Considera-se que este artigo foi uma contribuição paralela aos objetivos do trabalho como uma análise da implementação industrial de técnicas de controle avançado.

### **Organização do texto**

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos da seguinte forma:

**Capítulo 2: O Sistema Físico:** Neste capítulo, será feita uma descrição detalhada do forno petroquímico, objeto de estudo deste trabalho. O macro objetivo deste tópico é discorrer sobre os principais aspectos relacionados ao sistema físico do forno. A partir desta descrição espera-se propiciar ao leitor um entendimento das características do equipamento supracitado, as quais influenciam no controle da eficiência energética. Cabe destacar que fará parte deste capítulo a descrição detalhada a respeito do funcionamento das malhas de controle, responsáveis pelo controle do mecanismo de combustão.

**Capítulo 3: Estado da Arte:** Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica das estratégias de controle de sistemas de combustão, ilustrando os critérios utilizados no projeto de controladores preditivo, metodologia de identificação da função de transferência de processo. É parte deste capítulo efetuar a conexão entre a teoria de controle robusto e a aplicação prática. Em seguida, é ilustrado o algoritmo Fuzzy, usado na busca pelo controlador ótimo.

**Capítulo 4: Análise da Eficiência Energética no Forno Petroquímico.** Inicialmente, é feita uma análise de desempenho do sistema de controle do forno, de maneira a evidenciar prováveis pontos de melhoria. Logo em seguida, são apresentadas as limitações existentes no controle atual e são listadas as possibilidades de ganhos no processo em relação à eficiência térmica do mesmo.

**Capítulo 5: Resultados e Proposta de Melhoria no Controle do Sistema de Combustão.** Neste capítulo, é apresentada a avaliação preliminar realizada no controle do processo de combustão e a correlação com a eficiência energética (térmica). Em seguida, é apresentada a proposta de melhoria no sistema de controle regulatório de combustão objetivando a manutenção da eficiência energética e atendimentos aos índices de emissões atmosférica.

**Capítulo 6: Considerações finais.** Este capítulo faz as considerações finais a respeito do trabalho realizado e apresenta sugestões para trabalhos futuros.

## **Publicação**

Publicação em Revista Petro & Química edição 335, 2011 Título do Artigo: Análise da implementação comercial do controlador preditivo MPC (ANEXO A). Endereço do site de acesso à publicação da revista: Petroquímica & Instrumentação e Controle. Autores: Carlos Roberto Chaves Esp., TM Automação Industrial – Petrobras Mestrando Engenharia Elétrica UFPR, Gustavo Oliveira Dr., Professor – Universidade Federal do Paraná, Gideon Villar Leonardo Dr., Professor – Universidade Federal do Paraná, José Manoel PhD, Professor Universidade Federal do Paraná, Edson José Joaquim Souza Dr. Consultor–Petrobras.



## 2 O SISTEMA FÍSICO

Neste capítulo discorre-se sobre aspectos construtivos de um forno petroquímico. O objeto de estudo desta dissertação está alicerçado em um equipamento térmico (forno industrial petroquímico) com capacidade de geração térmica em torno de 50 MW. A justificativa para a seleção deste equipamento deve-se a sua similaridade construtiva se seu sistema de controle do processo de combustão e, conseqüentemente, de sua eficiência energética, quando comparada aos demais sistemas de geração de energia térmica no complexo de refino e petroquímico (geradores de vapor, caldeiras, fornos, etc.). Esta equivalência construtiva permite a aplicação de resultados aqui apresentados, com pequenas adequações, em diferentes plantas, mantendo sempre as premissas que norteiam produção de derivados de petróleo e o equilíbrio ecológico sustentável. É pertinente ressaltar que o desenvolvimento sustentável é um conceito sistêmico que se traduz como um modelo de desenvolvimento global que incorpora os aspectos de desenvolvimento da cadeia produtiva em harmonia com o meio ambiente (MONTEIRO, 2011).

O conceito de desenvolvimento sustentável surgiu durante a comissão de Brundtland, na década de 1980. Na ocasião a primeira ministra norueguesa, *Gro Harlem Brundtland*, apresentou a definição para o conceito. Segundo Brundtland (2004 apud BOFF 2008) “Desenvolvimento sustentável é a forma com as atuais gerações satisfazem as suas necessidades sem, no entanto, comprometer a capacidade de gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades”.

É imperativo que a cadeia produtiva invista em processos rentáveis e eficientes em relação aos aspectos macroeconômicos e principalmente pela manutenção do desenvolvimento sustentável.

Não é escopo deste trabalho a produção de citações de expressões e métodos de cálculo da área de fenômenos de transporte, transferência de calor. A proposta inicial é uma análise a qual esta pautada em termos macro. Também não faz parte do escopo deste trabalho a análise fenomenológica, porém o forno será considerado como uma caixa preta, ou seja, dotado de entradas, saídas, perturbações e função de transferência.

Este capítulo está estruturado como se segue. Na seção 2.1 será tratado os Aspectos Construtivos dos Fornos Petroquímicos, 2.1.1 Dispositivos do Sistema de

Controle de Combustão, 2.1.2 Controle Regulatório de Temperatura do Gás de Processo, 2.1.3 Malha de Controle de Excesso de Ar, 2.1.4 Critério de Seleção de Combustíveis, 2.1.5 Sistema de Digital de Controle, 2.1.6 Instrumentação de Campo, 2.1.7 Elemento Final de controle, 2.1.8 Sequenciamento da Operação do Forno: Acendimento e Sistema de Proteção de Chama do Processo de Combustão.

## 2.1 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DOS FORNOS PETROQUÍMICOS

De maneira geral o forno petroquímico é responsável pela elevação da temperatura do gás de processo através da troca térmica entre os gases aquecidos (quentes) da combustão e gás de processo. A transferência de energia térmica é realizada mediante a circulação do fluido processo no interior de um feixe de tubos, instalado na região interna do forno, também conhecida como região de radiação. Há uma variação funcional com relação ao sistema de radiação e/ou troca térmica. Em determinadas configurações os elementos da radiação simplesmente entregam o fluido em uma temperatura predeterminada para o próximo estágio do processo de troca térmica. Com relação ao sistema de troca térmica, uma segunda forma construtiva, se caracteriza por fornecer energia térmica e também promover reações no fluido enquanto o mesmo se desloca pelo feixe de tubos <sup>4</sup>radiação. De maneira ampla, os fornos petroquímicos são utilizados em grande parte dos processos caracterizados por correntes ou fluxo de hidrocarbonetos.

As unidades petroquímicas, em sua grande maioria, requerem um ou mais fornos pré-aquecedores do fluido de processo, fornos de craqueamento e fornos de reforma (CAMARGO, 2010). Na figura 2-1 é mostrado um forno petroquímico, utilizado no complexo de refino de petróleo, para transferência de energia térmica à carga de processo (petróleo).

---

<sup>4</sup> Transmissão de calor por radiação é o processo de transmissão de calor por meio de ondas eletromagnéticas. A energia emitida por um corpo (energia radiante) propaga-se até o outro, através do espaço que os separa. Sendo uma transmissão de calor feita por ondas eletromagnéticas, a radiação não exige a presença do meio material para ocorrer, à radiação ocorre no vácuo e também em meios materiais. Entretanto, não são todos os meios materiais que permitem a propagação das ondas de calor através deles (BRASIL, 1996).

Figura 2-1 – Forno petroquímico, complexo de refino de petróleo.



Fonte: Campos e Teixeira, (2007).

A diferenciação estrutural dos fornos petroquímicos pode ser caracterizada através dos detalhes construtivos. Neste sentido, os fornos são classificados de acordo com o serviço que executam e cada tipo de serviço exige do forno características próprias que influenciam no seu projeto.

Os fornos petroquímicos que operam em faixas de temperatura superior a 350°C têm a maior probabilidade de formação de coque, na parte interna e externa dos feixes de tubos. A ineficiência do sistema de controle de combustão aumenta significativamente a probabilidade de formação de coque.

Cabe pontuar que o coque é obtido pelo processo de coqueificação (LÁZARO, 2003), que consiste, em princípio, no aquecimento de moléculas de carbono em altas temperaturas. A formação de coque e/ou coqueificação é proveniente da ausência de oxigênio, o qual provoca a divisão das moléculas orgânicas da cadeia de carbono oriunda de combustíveis derivados de petróleo ou carvão mineral. Esta divisão da cadeia de carbono a temperaturas elevadas produz gases e compostos orgânicos sólidos e líquidos de baixo peso molecular e um resíduo carbonáceo relativamente não volátil. Este resíduo resultante é chamado de

“coque” (LAZARO, 2003), que se apresenta como uma substância porosa, heterogênea, sob os pontos de vista químicos e físicos. O primeiro estágio da coqueificação propriamente dita ocorre entre temperaturas da ordem de 350 °C a 550°C, com a liberação de hidrocarbonetos pesados e alcatrão.

De acordo com o tipo de serviço os principais fornos petroquímicos são:

## 2.0 - Fornos Refervedores (pré-flash)

A característica principal dos fornos refervedores (pré-flash) é em relação à faixa de temperaturas em que o mesmo opera. A faixa de temperatura da saída de gás de processo situa-se entre 280°C a 340°C. O fato de operarem em baixa de temperatura em relação aos demais fornos reduz a probabilidade de ocorrência de formação de coque. O coque gerado em fornos é um indicativo de comprometimento da eficiência do sistema de controle de combustão, podendo ocasionar diversos problemas relativos à transferência de calor.

## 2.0 - Fornos Atmosféricos

São fornos de grande porte, que operam com temperaturas de saída baixas (350°C a 370 °C). É devido ao gradiente de temperatura não apresenta probabilidade de formação de coque.

## 3.0 - Fornos de Vácuo

O forno de vácuo opera com temperatura de saída elevada (390°C a 420°C) e com produtos de alta viscosidade. Em função de operar com altas temperaturas há uma grande probabilidade de formação de coque.

## 4.0 - Fornos de Reforma Catalítica

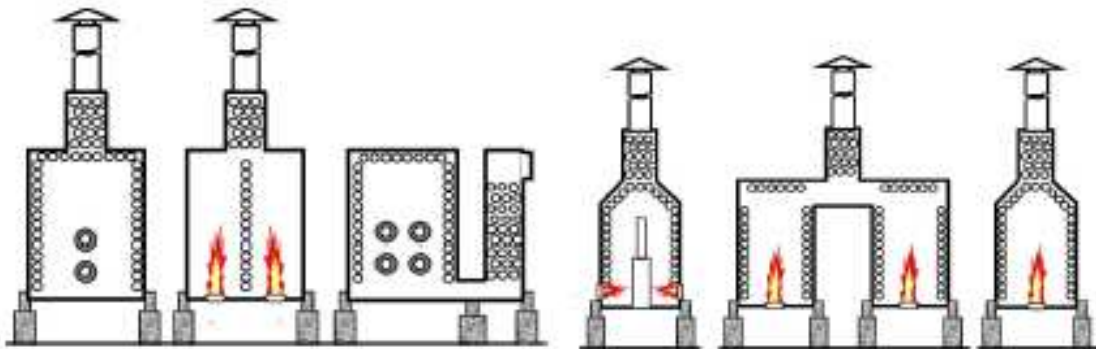
São fornos que operam com temperatura elevada de saída (500°C a 530 °C) é considerado crítico com relação à perda de carga.

## 5.0 - Reformadores / Pirólise

São fornos que operam com temperaturas de metal extremamente elevadas (800°C a 900°C).

Com relação aos aspectos construtivos, há três tipos principais de fornalhas e/ou de câmara de combustão, classificadas de acordo com a posição dos tubos da radiação. No modelo construtivo horizontal, os tubos da seção de aquecimento da carga, da seção de radiação e da seção de convecção são distribuídos horizontalmente em relação aos queimadores instalados no piso. Os feixes de tubos na configuração horizontal são dotados de convecção extensas na qual é absorvida grande parte da carga térmica (BAUKAL; SCHWARTZ, 2001). O forno petroquímico com tubos acomodados na posição horizontal situa-se em grandes áreas de instalação e necessita de um espaço adicional para movimentação e/ou retirada dos tubos eventos de manutenção. Outro aspecto importante relacionado aos detalhes construtivos deste forno é a possibilidade de aproveitamento da temperatura do gás de combustão conduzidos para a chaminé, com esta medida há uma redução do investimento de empreendimento. Na figura 2-1 é ilustrada a montagem construtiva típica de fornos petroquímicos com feixe de tubos na posição horizontal.

Figura 2-2 – Forno petroquímico típico construtivo horizontal, posição do feixe de tubos da radiação e convecção



Fonte: Baukal e Schwartz, (2001).

Através de solução de engenharia, é possível aquecer o gás de processo na carcaça dos dutos de combustão aproveitando a diferença de temperatura entre os mesmos, promovendo a troca térmica. Ou seja, com a utilização de paredes divisórias, é possível o compartilhamento da secção de convecção através dos fumos conduzidos para a chaminé.

O forno com estrutura de tubos horizontais é indicado para fluidos de processos que apresentem grande probabilidade de sujidade durante o período de

campanha (limpeza interna dos tubos). Em função do elevado diâmetro da seção de convecção, a mesma apresenta alta eficiência, não necessitando de sistema de pré-aquecimento de ar. Na figura 2-3, é mostrada a seção transversal de um tubo de radiação. Nesta figura, pode-se observar a deposição de material particulado nas paredes internas do tubo. Este material é resultado do processo de deposição de componentes do gás de processo, em regiões de baixa velocidade (BAUKAL; SCHWARTZ, 2001).

Figura 2-3 – Tubo de radiação, deposição de particulado, devido a regiões de baixa velocidade, efeito camada limite (velocidade)



Fonte: Sampaio, (2008 p. 26).

Neste momento, faz-se necessário pontuar a respeito do efeito da deposição de particulados nas paredes internas dos tubos da radiação e/ou convecção em relação ao sistema de controle de temperatura do gás de processo. O principal resultado da deposição de particulado nas paredes internas dos tubos da radiação e convecção é o efeito pelicular, onde a partícula age como um isolante térmico. Este isolamento compromete a <sup>5</sup>troca térmica entre o gás de processo e os gases da combustão. Desta forma, o sistema de controle de temperatura solicitará uma

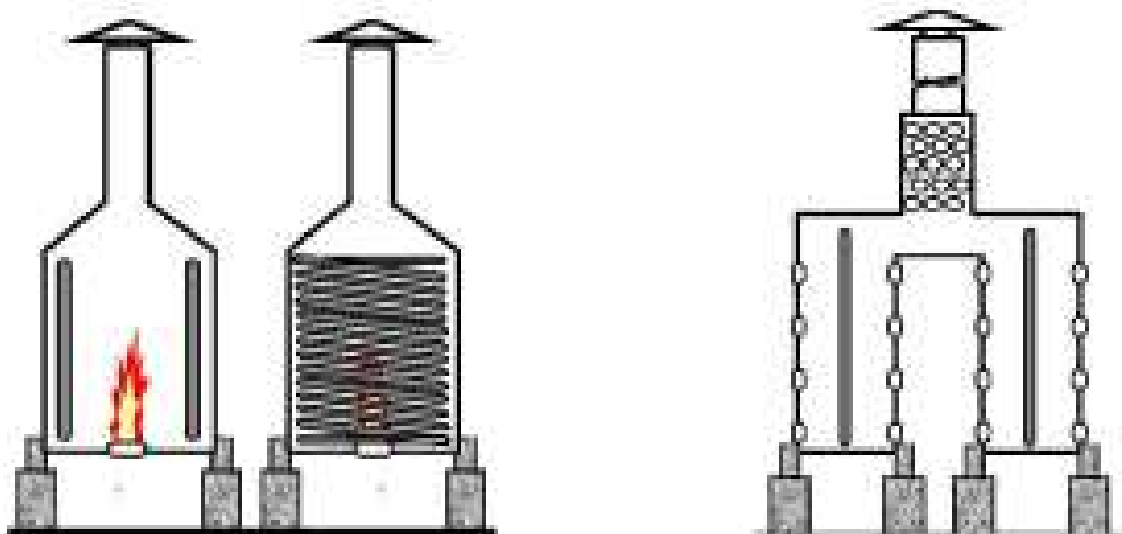
---

<sup>5</sup> Em física, transferência, transmissão ou propagação de calor, algumas vezes citada como propagação ou transferência térmica, é a transição de energia térmica de uma massa (corpo) mais quente para uma massa mais fria. Em outras palavras, é a troca de energia calorífica entre dois sistemas de temperaturas diferentes (BAUKAL; SCHWARTZ, 2001).

quantidade maior de combustível (massa) para compensar a diminuição da troca térmica, ou seja, a eficiência do forno em termos de desempenho ficará comprometida. Outro efeito não menos importante é a degradação do material do feixe de tubos, uma vez que este é exposto a temperaturas superiores aos limites preconizadas e/ou indicadas pelo fabricante. Desta maneira, poderá ocorrer um comprometimento do ciclo de vida útil do material do feixe de tubos. O tema sistema de controle será abordado em capítulo específico, onde este assunto voltará a ser retomado.

As fornalhas do tipo vertical são caracterizadas pela disposição dos tubos da radiação e convecção na posição vertical, nas proximidades do círculo dos queimadores. Em sua grande maioria, as fornalhas do tipo vertical possuem seção de convecção de pequeno porte. Existem configurações onde o feixe da radiação é o mesmo da convecção, esta modalidade de disposição dos tubos torna o custo de fabricação inferior aos fornos com feixes horizontais. A razão pela qual este equipamento possui custo menor que forno do tipo horizontal é devido à disposição física dos tubos (vertical) colaborando para a diminuição da área efetiva. Esta disposição física do feixe de tubos (configuração do feixe vertical) permite que o fluido de processo circule apenas pela região de radiação. Ainda com relação ao sistema de disposição construtiva vertical, é importante salientar que o mesmo apresenta custo inferior em relação aos modelos horizontais, justificada pela menor área construtiva (área geométrica) (BAUKAL; SCHWARTZ, 2001) A figura 2-4 ilustra o modelo de forno vertical.

Figura 2-4 – Forno vertical, área reduzida em função da disposição dos tubos de radiação.



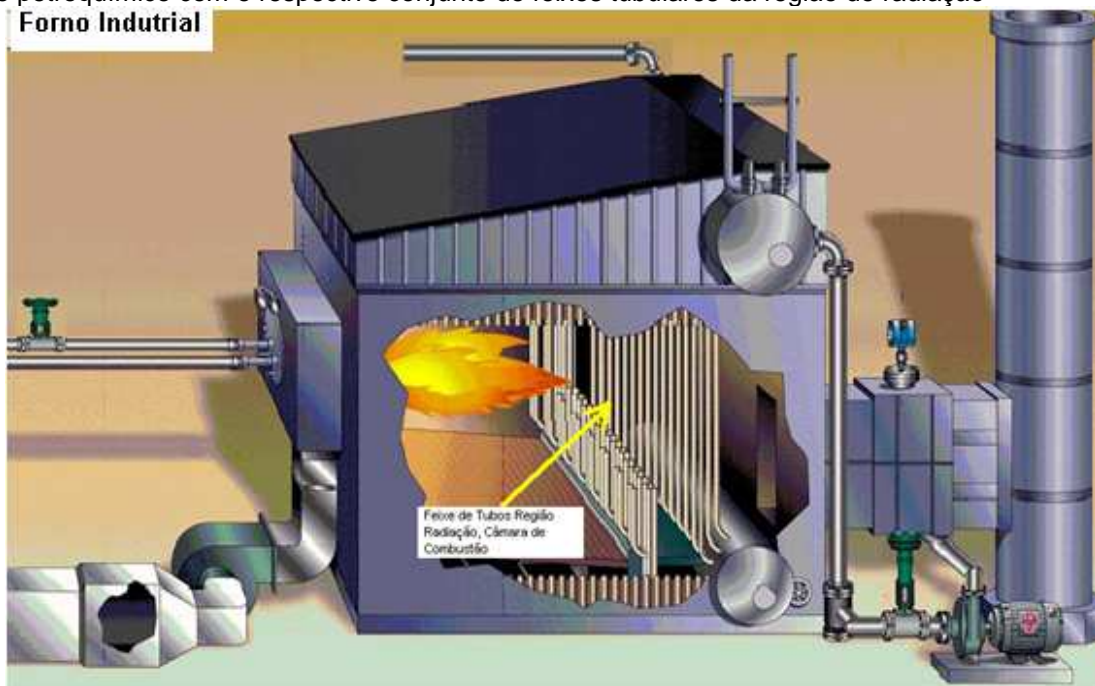
Fonte: Baukal e Schwartz, (2001).



Por fim, há configuração tipo mista. Neste modelo, os tubos da radiação são dispostos na vertical e os tubos da seção da convecção são fixados na posição horizontal. Cabe destacar que dependendo do tipo de processo e/ou aplicação, o circuito de convecção pode ser utilizado como gerador de vapor em vez de elemento de troca térmica para aquecimento do gás processo.

Em síntese, a massa de energia térmica decorrente da queima de combustíveis fósseis (óleo e/ou gás) proveniente da câmara de combustão é liberada para a parte externa do feixe de tubos situados na câmara de radiação. Os tubos da região da radiação os quais recebem parte do calor, os tubos são tipicamente instalados nas proximidades das paredes laterais e no teto da câmara de combustão. Nesta região, o mecanismo predominante de troca térmica é a radiação (BAUKAL; SCHWARTZ, 2001). A zona de convecção é o é um dos principais componentes do mecanismo de troca térmica e/ou transferência de calor. Esta configuração visa garantir o máximo de aproveitamento da energia térmica proveniente dos fumos da combustão. A Figura 2-5 ilustra a disposição da câmara de combustão de um forno petroquímico com o respectivo conjunto de feixes tubulares da região de radiação.

Figura 2-5 – Estrutura física representativa de um forno, disposição da câmara de combustão de um forno petroquímico com o respectivo conjunto de feixes tubulares da região de radiação



Fonte: Baukal e Schwartz, (2001).



Em geral, a fornalha e/ou câmara de combustão é responsável pelo processo de combustão e geração de energia térmica. Conforme citado ao longo do texto, durante o processo de combustão podem ocorrer problemas relativos à formação de gases nocivos ao meio ambiente o que, conseqüentemente, contribui com o <sup>6</sup>efeito estufa. O controle do processo de combustão tem como objetivo contribuir para a manutenção da estabilidade e dos mecanismos e dispositivos do sistema de queima e/ou geração de energia térmica (BRASIL, 1996). Neste contexto, objetiva-se a avaliação da eficiência energética de sistemas de queima e/ou combustão que possibilitem a diminuição da emissão de poluentes e a cogeração de energia. Isto torna o processo como um todo mais eficiente, tanto do ponto de vista tecnológico e ambiental. No capítulo 3, será feita abordagem específica a respeito do estado da arte em controle automático de processos industriais.

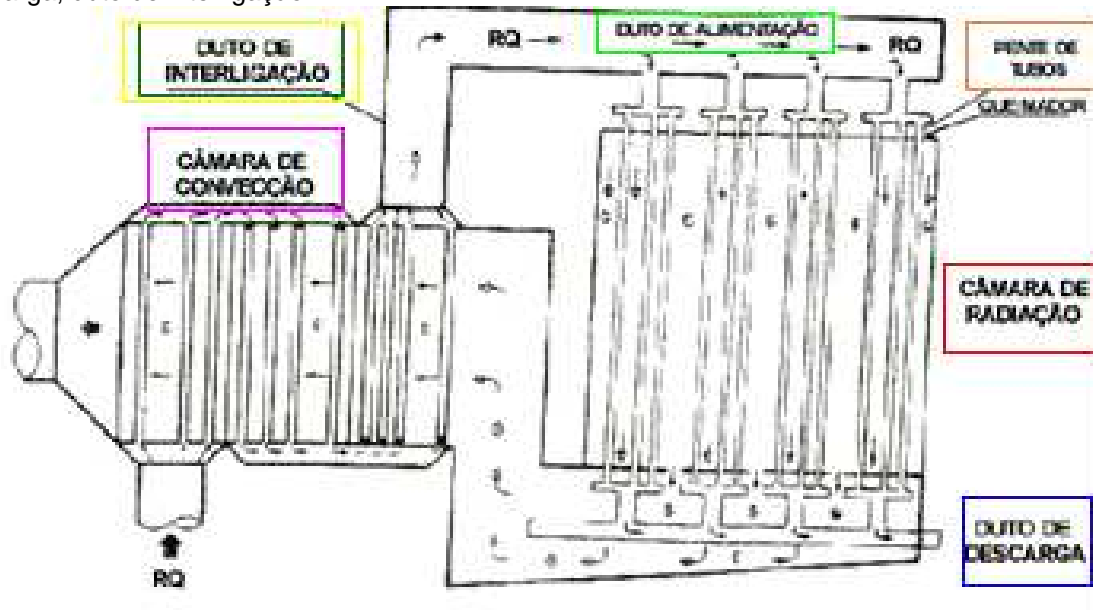
### **2.1.1 Dispositivos do Sistema de Controle de Combustão**

O forno industrial foi projetado para produzir em torno de 34,2 milhões de kcal/h, a partir de queima de óleo e/ou gás combustível. O propósito do forno dentro do processo petroquímico é fornecer energia térmica ao gás de processo, proveniente da descarga de um compressor axial, a uma temperatura pré-definida de maneira a contribuir com a reação em um reator de pirólise (retorta). O F-X é um forno com câmaras de combustão e convecção de formas retangulares, estando a câmara de combustão montada na posição vertical e a de convecção na horizontal. A figura 2-6 ilustra a disposição das principais partes deste equipamento.

---

<sup>6</sup> O efeito estufa é um processo que ocorre quando uma parte da radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre é absorvida por determinados gases presentes na atmosfera. Como consequência, a energia térmica é retida e/ou mantida na atmosfera terrestre, provocando um aquecimento global e alterações no clima. Dentro de uma determinada faixa de temperatura o efeito estufa é de vital importância para aos seres vivos que habitam esta atmosfera, ou seja, a manutenção da vida (HOUGHTON, 2004).

Figura 2-6 – Forno: câmara combustão, câmara radiação, convecção duto de alimentação, duto de descarga, duto de interligação



Fonte: Petrobras, (1998).

A energia gerada na câmara de combustão é proveniente de doze queimadores posicionados na parte superior da fornalha. O processo de combustão, conhecido como reação de oxidação, ocorre na câmara de combustão em consequência da mistura de combustível e comburente (ar). O conjunto de queimadores são os equipamentos responsáveis pela mistura do comburente (ar) e combustíveis óleo e/ou gás. Esta mistura promove a reação de oxidação (chama) e consequentemente à emissão das radiações eletromagnética (calor) e energia luminosa. Através da figura 2-7 é possível identificar visualmente a região de radiação observa-se a coloração rubra (cor laranja) em função da temperatura, situada em torno de 1200 ° C.

Figura 2-7 – Câmara radiação do forno industrial, região de radiação com coloração rubra (cor laranja) em função da temperatura, situada em torno dos 1200 °C

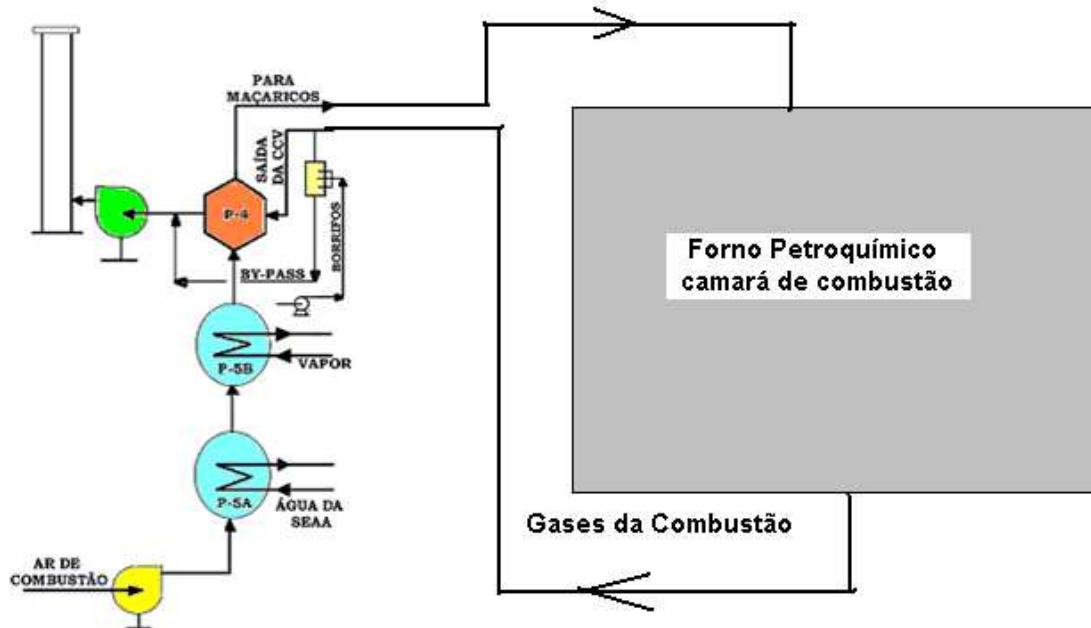


Fonte: Serfaty, (2007).

O oxigênio (<sup>7</sup>comburente), componente necessário para a combustão, é extraído do ar atmosférico através de um equipamento chamado de soprador centrífugo. A remoção dos gases da combustão oriundos da fornalha ou da câmara de combustão é feita de forma balanceada e controlada por um soprador induzido. Faz parte do circuito de injeção de ar de combustão um procedimento de pré-aquecimento. O pré-aquecedor de ar para combustão recupera parte do calor residual dos gases de combustão lançados para a chaminé. Como citado no parágrafo inicial, a função do forno é fornecer energia térmica (calor), proveniente da radiação, para promover o aquecimento do gás de processo. A transferência de calor é realizada nas duas câmaras, sendo o calor de convecção utilizado como pré-aquecimento e o calor da radiação para o aquecimento final do gás de processo. A figura 2-8 ilustra todo o trajeto do fluxo de ar antes de entrar nos queimadores.

<sup>7</sup> Comburente é todo elemento que, associando-se quimicamente ao combustível, é capaz de fazê-lo entrar em combustão na presença de uma fonte de calor inicial (o oxigênio é o principal comburente). Em resumo, é a substância que alimenta a combustão. Do latim *comburente*, participio de *comburere*, queimar (GUERRA; COELHO; LEITÃO, 2006).

Figura 2-8 – Circuito do pré-aquecedor de ar para o mecanismo de combustão do forno

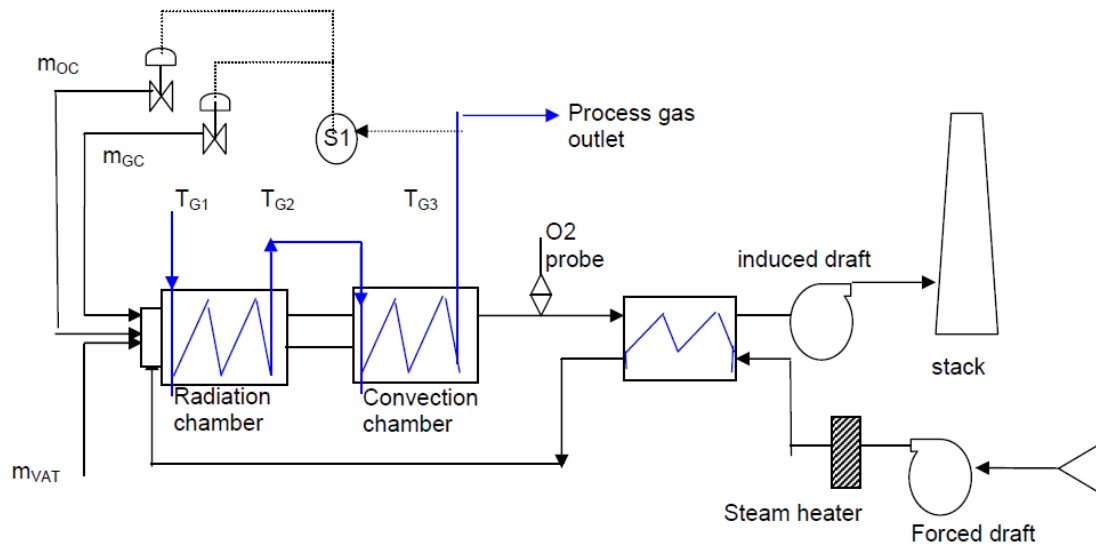


Fonte: Petrobras, (1998).

A energia térmica transferida ao gás de processo é obtida através do sistema de reciclo quente (RQ), ou seja, por meio da circulação da massa de gás de processo no interior dos tubos cilindros da câmara de radiação e convecção. A energia cinética do gás de processo (fluxo de gás de processo) é provida por um compressor centrífugo. O gás de processo entra no final da seção de convecção, zona mais fria, com uma temperatura na ordem de aproximadamente 180 °C, troca calor com os gases de combustão que circula pelo lado externo dos tubos, e é encaminhado para a chaminé. A temperatura de saída dos gases da combustão é de aproximadamente 300 °C ou 350 °C. Na seção de convecção, o sentido do fluxo do gás de processo é contrário ao fluxo dos gases de combustão.

Na figura 2-9 é disponibilizado o diagrama de blocos do contendo seção de radiação, convecção, circuito de ar de combustão e sistema de controle de temperatura da massa de gás de processo.

Figura 2-9 – Diagrama de blocos funcionais do forno



Fonte: Souza, (2008).

O diagrama de blocos funcional mostrado na figura 2.9 exemplifica o sistema de controle de temperatura de gás de processo (process gas outlet). A temperatura do gás de processo é mantida em um valor pré-determinado através de uma malha de controle injeção de combustíveis para o mecanismo de combustão (queimadores). Em determinadas circunstâncias, onde a presença de perturbação introduzida pelo aumento ou diminuição da vazão de gás de processo produz alterações no comportamento dinâmico do equipamento tais como diminuição da pressão do gás combustível, etc. O sistema de controle, representado por S1 na Figura 2.8, demandará uma determinada quantidade de massa de combustíveis em função da massa térmica necessária para manter a temperatura de saída do gás de processo em um determinado patamar, sendo que:  $M_{OC}$  representa a massa de óleo combustível e  $M_{GC}$  à respectiva massa de gás combustível (SOUZA, 2008). Um incremento ou decremento da vazão de combustível implica consecutivamente a alteração da massa de ar ( $M_{VAT}$ ) e tem como objetivo manter a relação estequiométrica de combustão (queima completa). O analisador de  $O_2$  (probe) é parte integrante do sistema de controle de excesso  $O_2$  (ar de combustão). O gás de processo durante o trajeto entre convecção e radiação recebe incrementos de temperatura, de acordo com as siglas:  $T_{G1}$ ,  $T_{G2}$  e  $T_{G3}$ .

Após a zona de convecção  $T_{G1}$ ;  $T_{G2}$ , o gás de processo segue para a câmara de radiação  $T_{G3}$  através de dois dutos que alimentam oito coletores

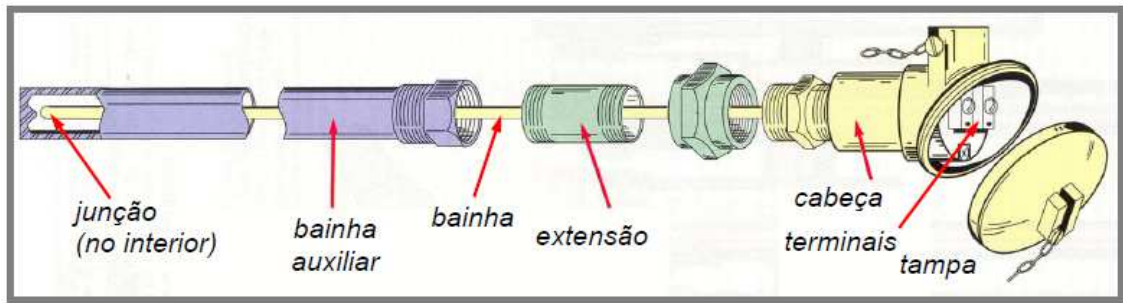
superiores, quatro de cada lado, localizados no topo do forno. Por meio dos coletores superiores, o gás desloca-se pelos tubos os quais estão expostos ao calor de radiação (fluxo concorrente com os gases de combustão). Este gás pode ser aquecido a uma temperatura predeterminada, para entrada no reator de pirólise. O fluxo de gases do processo da reação oxidação desloca-se através da câmara de combustão pelo piso, por meio de quatro aberturas, e são coletados em um duto geral que está interligado com a câmara de convecção (SOUZA, 2008). Os gases de combustão entram na zona de convecção com temperatura superior a 800 °C e deslocam-se entre os feixes tubulares, onde ocorre a então troca térmica com os tubos desta seção. A temperatura dos gases de combustão oriundos da região de convecção está situada em torno de 300 °C.

Neste momento, cabe destacar que não está entre os objetivos desta dissertação descrever critérios de projeto mecânico do forno, uma vez que o propósito específico é a análise do desempenho energético do equipamento como também a construção de métodos e arranjos de sistemas de controle.

### **2.1.2 Controle Regulatório de Temperatura do Gás de Processo**

De acordo com as observações efetuadas na introdução, o forno F-X, é responsável pela geração da energia térmica necessária para o processo de pirólise do reator. A temperatura de saída do gás de processo deve ser mantida constante independente da vazão ou temperatura de entrada. Desta maneira o controle da temperatura do gás de processo é mantido por uma malha de controle com estrutura funcional mestre e escravo. Esta malha de controle é identificada através do sequencial de letras TIC, de acordo com a norma ANSI/ISA-5.1-1984 (RIBEIRO, 2008). A malha de controle de temperatura TIC é dotada de um elemento primário, termopar, o qual mede a temperatura de saída do gás de processo, após o mesmo adquirir energia térmica. A figura 2-10 ilustra detalhes construtivos do termopar, elemento utilizado para medição de temperatura do gás de processo.

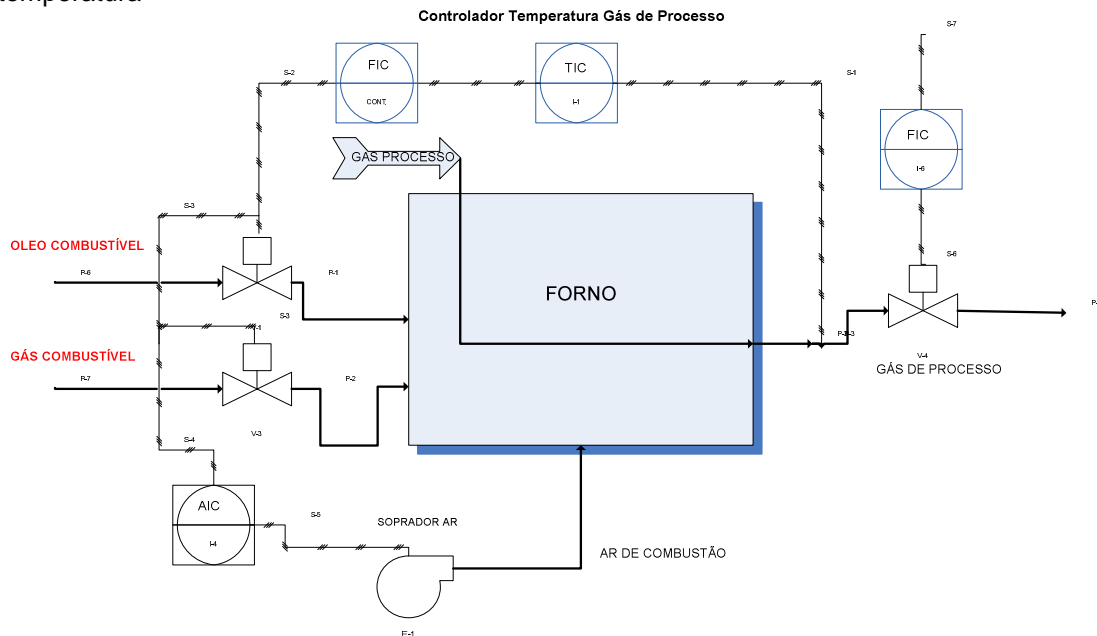
Figura 2-10 – Detalhe construtivo do termopar, utilizado para medição de temperatura do gás de processo.



Fonte: Silva, (2004).

A malha de controle de temperatura (malha mestre), é responsável por manter a temperatura do gás de processo dentro de um valor predeterminado aderente a máxima <sup>8</sup>eficiência energética, ou seja, a energia empregada na reação deve ser suficiente para promover a produção rentável de derivados em conformidade com os limites de emissão atmosférica. Na figura 2-11 ilustra o circuito de troca térmica do gás de processo e a malha de controle de temperatura.

Figura 2-11 – Fluxograma do circuito de aquecimento do gás de processo com a malha de controle de temperatura

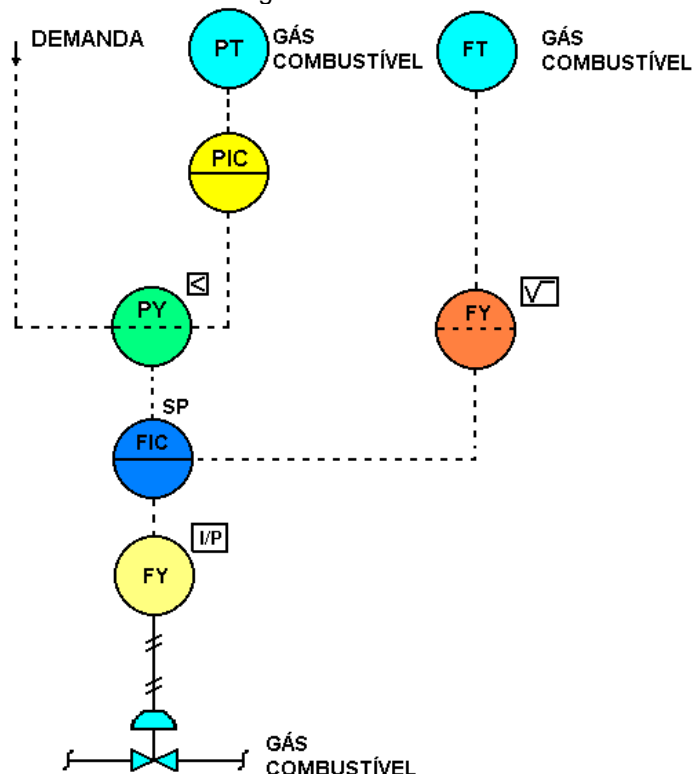


Fonte: O autor.

<sup>8</sup>Ação referente à Eficiência Energética tem como meta o emprego de técnicas e práticas capazes de promover os usos “inteligentes” da energia, reduzindo custos e produzindo ganhos de produtividade e de lucratividade, na perspectiva do desenvolvimento sustentável. (HORDESKI, 2005).

Através do fluxograma da figura 2-11, observa-se a disposição lógica da estratégia de controle da malha de temperatura. Quando ocorre um distúrbio de demanda e/ou variação no set-point, o controlador e indicador de temperatura (TIC), transmite um sinal de saída para as respectivas malhas de controle de gás e óleo combustível. Por sua vez os respectivos controladores das malhas de gás e óleo combustível incrementam e/ou decrementam variável manipulada (MV), em função da demanda necessária de energia (térmica) para o restabelecimento das condições de estabilidade (temperatura de saída do gás de processo). A quantidade volumétrica de  $O_2$  necessária para a combustão é ajustada em função da quantidade de combustível. A estratégia de controle razão é utilizada com o objetivo de controlar a mistura de combustível e comburente. Em relação ao calculo da demanda de energia térmica necessária, esta é decorrência da quantidade de calor necessária para manter a temperatura do gás de processo dentro da faixa de operação desejada. A figura 2-12 mostra a malha de controle de óleo e gás combustível.

Figura 2-12 – Malha de controle de óleo e gás combustível



Fonte: O autor.



O sinal saída do controlador de temperatura, como citado no parágrafo anterior, antecipa a correção da vazão dos combustíveis em função de alterações na vazão do gás de processo. O sistema de controle de temperatura é caracterizado pela inércia térmica onde a massa refratária do isolamento interno existente nos dutos coletores inferiores do gás de processo contribuem para a introdução de um atraso no tempo de resposta do sistema. Outro fato que contribui para aumentar o atraso de transporte é que o elemento de medição de temperatura (termopar) estar instalado após a junção dos dois coletores de saída de gás de processo. Em determinadas circunstâncias, poderá ser necessária uma diminuição de vazão do gás de processo, o qual influencia na temperatura de saída do gás de processo, ou seja, ocorrerá uma lenta elevação da energia térmica, em função da grande massa de <sup>9</sup>refratário instalada nos dutos coletores (saída de gás de processo para reator).

A temperatura nos tubos verticais da radiação, será afetada pela redução e/ou diminuição da vazão de gás de processo. A temperatura externa do feixe de tubo (temperatura de pele dos tubos) poderá elevar-se proporcionalmente em função da diminuição da vazão do gás de processo (SOUZA, 2008). Este evento poderá provocar um superaquecimento dos tubos, antes que o controle de temperatura retroalimente as malhas de controle de combustíveis. Em decorrência desta hipótese de dano aos tubos de condução do gás de processo e troca térmico, o sistema de controle de combustão é dotado de um mecanismo de intertravamento de segurança, visando garantir uma operação segura acima do limite de vazão mínima de refrigeração dos tubos de troca térmica da radiação e convecção (SOUZA, 2008).

### **2.1.3 Malha de Controle de Excesso de Ar**

O ar de combustão é ajustado em função da quantidade de combustível necessária para manter a temperatura do gás de processo dentro do limite pré-determinado. Ou seja, o sinal correção da vazão de ar de combustão para os queimadores é controlado pela malha de vazão FIC (controlador e indicador de vazão). Nesta malha de controle o elemento de medição da variável a ser controlada

---

<sup>9</sup>O termo refratário é atribuído a um conjunto de materiais, em sua maioria cerâmicas, com capacidade de suportar altas temperaturas sem perder suas propriedades físico-químicas, entre elas, resistência, alta condutividade térmica e condutividade elétrica. Usualmente são encontrados em fornos industriais, laboratórios de pesquisa, caldeiras, entre outras aplicações (ARAUJO, 1997).

(O<sub>2</sub>) é um analisador de oxigênio (óxido de zircônio). A amostragem do teor de O<sub>2</sub> e <sup>10</sup>CO<sub>2</sub> é realizada de modo contínuo. Esta medição é realizada antes dos gases provenientes da combustão serem lançados para chaminé. Parte da energia térmica contida nos fumos da combustão é recuperada por um trocador de calor (rotativo), posterior ao sistema de amostragem de O<sub>2</sub>.

Com relação ao volume O<sub>2</sub> (massa) necessário para queima completa, parte-se da premissa que, conhecendo-se a composição dos combustíveis e com base na estequiometria da combustão, consegue-se calcular a quantidade teórica de ar necessária para queima dos combustíveis. Estes parâmetros fazem parte dos blocos de controle inseridos na estratégia da malha.

Um aspecto importante que merece ser comentado é em relação à proteção de modo de falha do equipamento (forno). A lógica de contemplar em sua estrutura funcional, algoritmos de controle que propicie a identificação de falha operacional do analisador excesso de O<sub>2</sub>. O equipamento poderá falhar indicando um valor superior de O<sub>2</sub> em relação ao valor real, esta falha estabelece um corte de vazão de O<sub>2</sub> e conseqüentemente uma queima incompleta, ou seja, parte do combustível não será queimado, e o calor disponível no combustível não queimado será perdido através da chaminé.

Uma maneira de contornar este modo de falha é utilizar-se uma quantidade de ar superior ao ar teórico calculado. Procura-se, assim, garantir que a quantidade em massa de moléculas de oxigênio estejam em uma maior quantidade (+/- 3%), em relação a massa de combustível de maneira a propiciar uma combustão completa, com um mínimo de excesso de oxigênio (relação estequiométrica para a combustão combinada de gás combustível e óleo). Este ar adicional é chamado de excesso de ar, sendo normalmente expresso como porcentagem do ar teórico. O excesso de ar mais o ar teórico são chamados de ar total. A redução do excesso de ar reduz a massa dos gases da combustão e aumenta a transferência de calor para geração de vapor (SOUZA, 2008). O valor aceitável de excesso de ar a ser utilizado depende, principalmente, do tipo de combustível, tipo de queimador, características e condicionamento do combustível (temperatura, pressão, viscosidade, <sup>11</sup>poder

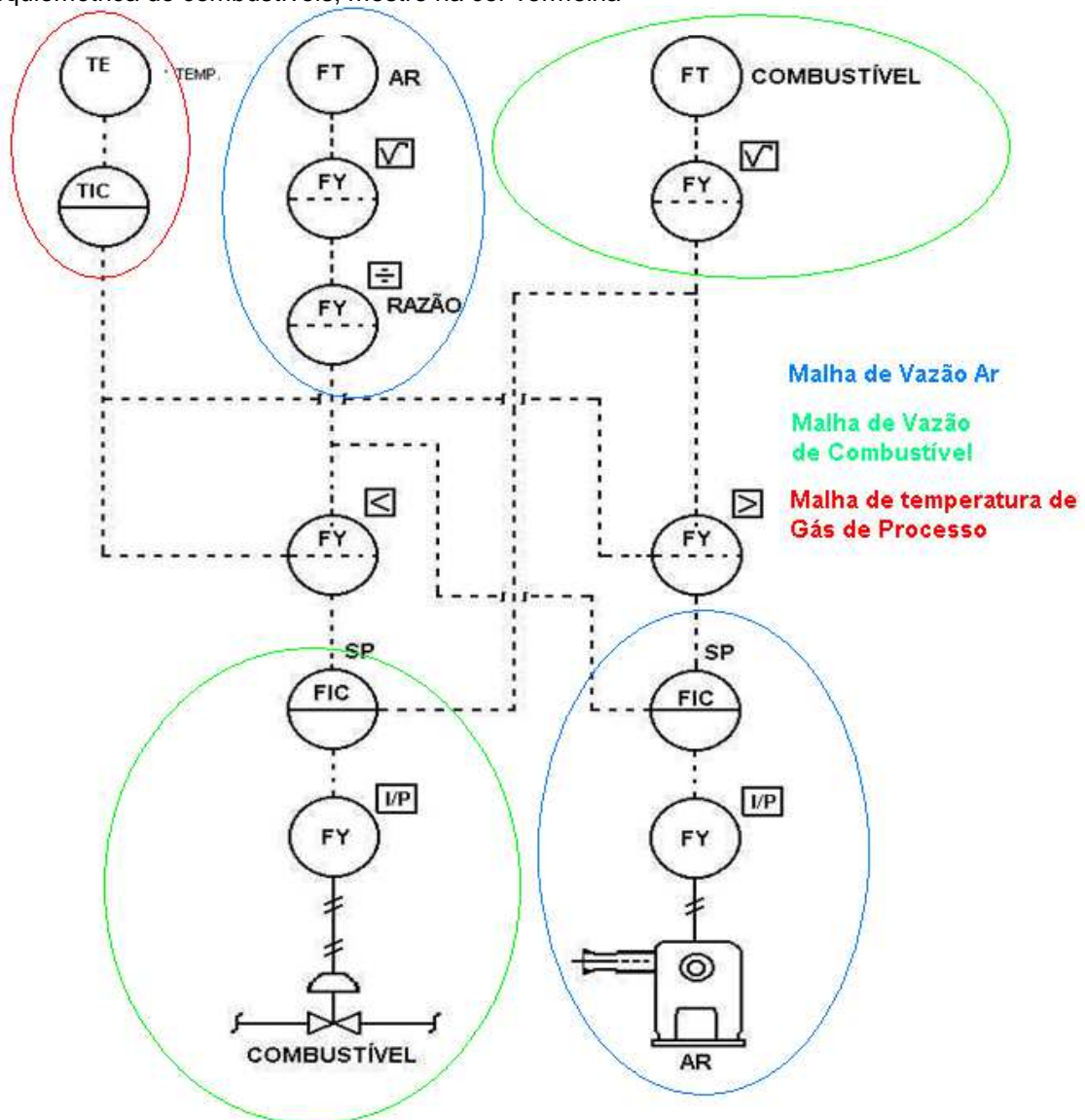
---

<sup>10</sup> O dióxido de carbono ou anidrido carbônico (gás carbônico) é um composto químico constituído por dois átomos de oxigênio e um átomo de carbono. A representação química é CO<sub>2</sub> (KEELING, 1978).

<sup>11</sup> O poder calorífico de um combustível é a quantidade de energia que é liberada durante a combustão completa da unidade de massa ou unidade de volume (LORA, 2004)

calorífero, etc.) tipo de câmara de combustão, carga (como porcentagem da carga máxima), da malha de controle de combustão utilizada entre outros fatores. Na figura 2.13 é mostrado, circundada na cor azul, o diagrama a malha de controle de vazão de ar para combustão, Esta malha está configurada de maneira a fornecer uma determinada quantidade de massa de ar em função da quantidade de combustível, razão estequiométrica de combustíveis.

Figura 2-13 – Malha de controle de vazão de ar para combustão em razão da quantidade estequiométrica de combustíveis, mestre na cor vermelha



Fonte: O autor.

### 2.1.4 Critério de Seleção de Combustíveis

A malha mestre de temperatura (controlador de temperatura) introduz a correção necessária nas vazões dos combustíveis para os queimadores através de alteração nos "*set-point*", dos controladores de pressão de óleo e gás combustível. A estratégia de controle leva em consideração a disponibilidade dos combustíveis, ou seja, enquanto a pressão de gás combustível permanecer dentro de uma faixa e/ou limite aceitável, é consumido preferencialmente pelo sistema de combustão a gás combustível (SOUZA, 2008). O algoritmo de controle de seleção de combustível é implementado através de filtros matemáticos chamados de seletores de mínima e máximo. Alguns fabricantes de sistemas digitais de controle, utilizam uma simbologia proprietária para representar os blocos matemáticos seletores de mínima e máximo, também conhecido como relé de mínima e relé diferencial, conforme indicado na figura 2.13. O sinal controle oriundo da malha de controle de temperatura é comparado no Relé (PY-A), ou seja, este relé seleciona apenas o sinal de menor valor. O controlador da pressão do gás combustível recebe a informação de "*set-point*" e promove a alteração da posição da válvula de controle. O seletor de mínimo PY-XX-B compara os dois sinais recebidos e havendo diferença nestes, emite um sinal do diferencial para ajuste no "*set point*" do PIC-XX (controlador e indicador de pressão), controlador da pressão do óleo combustível para os queimadores. Na estratégia de controle a preferência é pela queima do gás combustível, em função da sua disponibilidade e poder calorífico, em comparado com o óleo combustível.

Caso ocorra uma diminuição da pressão do ramal ("*header*") de gás combustível, o seletor de mínima (relé), lógica de seleção, introduzirá um *novo "set-point"* (valor desejado) para a malha de controle de vazão de gás, reduzindo o consumo de gás combustível no forno. A lógica de controle através dos seletores de mínima também selecionará um novo valor para o controlador de óleo combustível de modo a estabelecer uma compensação da energia térmica exigida pelo controlador de temperatura. O controlador de vazão de óleo combustível compensará a diferença de energia necessária (Kcal) para a manutenção da temperatura na câmara de radiação. Todos os aspectos de controle, abordados nesta secção podem ser observados no diagrama da figura 2-14.

### 2.1.5 Sistema de Digital de Controle Distribuído

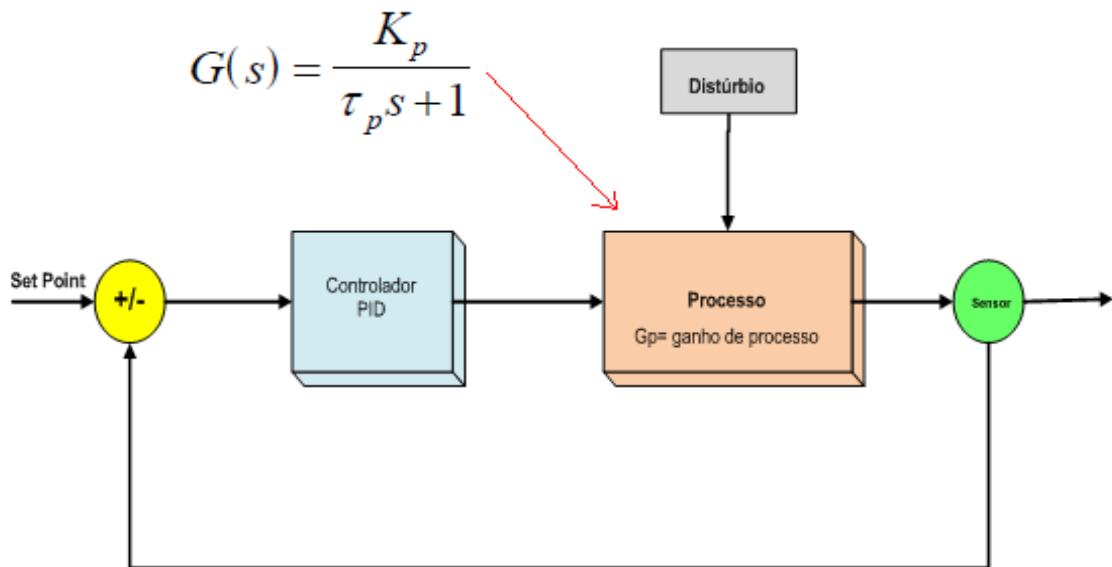
As malhas de controle responsáveis pela manutenção da temperatura do forno de modo direto e/ou indireta são tipo siso (single input single output). Com relação às malhas de vazão de óleo, gás combustível e vazão de ar, estas são caracterizadas basicamente pela interconexão de vários componentes tais como: válvula de controle, elemento sensor e transmissor, controlador.

O controlador é em essência é o elemento que executa as funções de controle, é considerado o elemento principal de uma malha. O diagrama de blocos da figura 2-15 mostra um bloco de controle PID, neste exemplo a variável controlada é convertida em uma grandeza conhecida, por um transdutor (sensor, elemento primário) e transmitida para o controlador através de um sinal padronizado. O controlador PID executa a seguinte operação aritmética: comparação entre o valor desejado e o sinal da variável de processo (soma), se o resultado desta operação matemática resultar em um desvio entre as variáveis, o controlador promoverá a correção da variável controlada aplicando as ações de controle, proporcional, integral e derivativa (quando aplicável) (CAMPOS; TEIXEIRA 2007). A intensidade do sinal de saída do controlador irá variar de acordo com os valores das constantes proporcional, integral e derivativa, visando eliminar o erro de regime. O processo representado pelo bloco da figura 2-14, representado pela função de transferência, onde:  $K$  ganho do processo,  $t_p$  constante de tempo. O controle regulatório PID é considerado um sistema reativo, ou seja, a atuação efetivamente é estabelecida somente quando a ocorrência de um <sup>12</sup>distúrbio no processo.

---

<sup>12</sup>O distúrbio e/ou perturbação processo é considerado um sinal que tende a afetar adversamente o valor da saída de um sistema (CAMPOS; TEIXEIRA, 2007).

Figura 2-14 – Diagrama de blocos do controlador PID

**Função de Transferência do Processo**

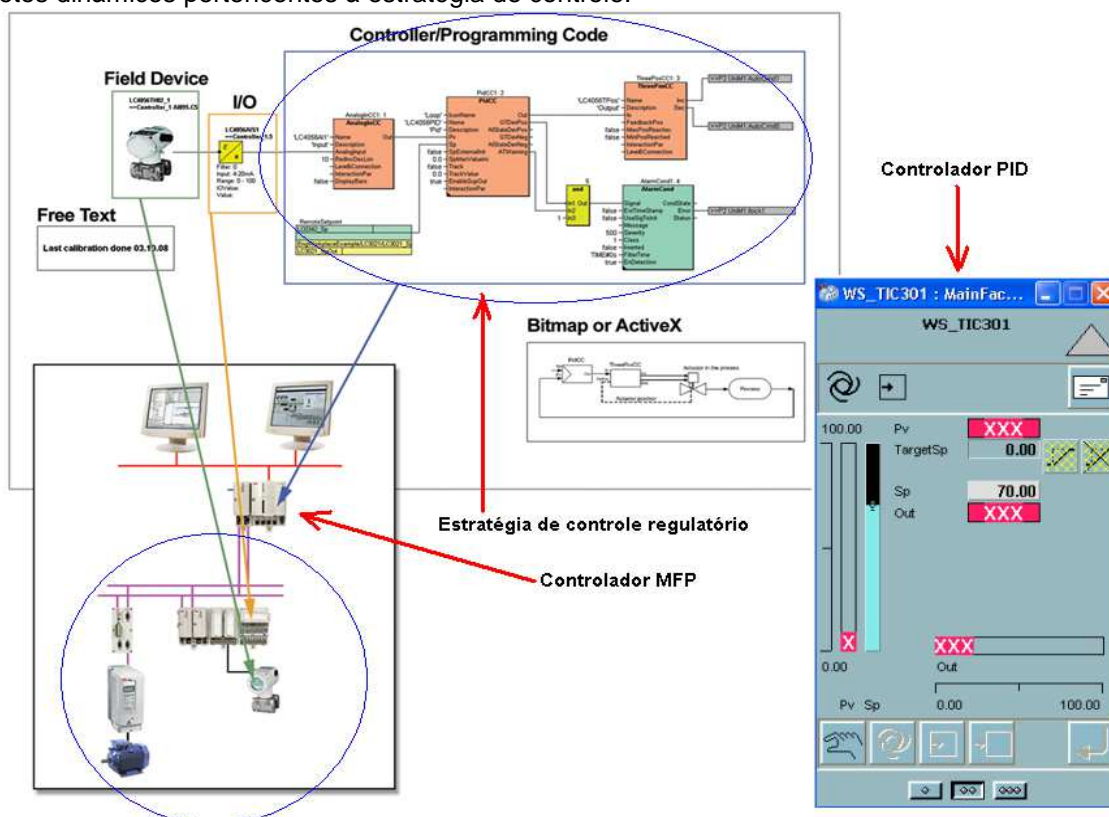
Fonte: O autor.

Um dos fatores que pode ser atribuída à grande utilização dos controladores PID é sua facilidade de configuração mediante a uma larga faixa de aplicação e condições de processo, e por fim a sua simplicidade funcional (CAMPOS, 2007). O forno F-X conta com um sistema digital de controle distribuído, de fabricação da ABB. O sistema digital de controle distribuído ou SDCD é um equipamento que tem como função executar as estratégias de controle regulatório do processo industrial de maneira a propiciar a <sup>13</sup>otimização da produtividade industrial, através das ferramentas computacionais disponíveis na sua arquitetura integrada. Com o SDCD é possível obter a diminuição de custos de produção, melhoria na qualidade dos produtos, estabilidade do processo, segurança operacional, entre outros. O sistema digital de controle distribuído é composto basicamente por um conjunto integrado de dispositivos que se completam no cumprimento das suas diversas funções de supervisão do processo produtivo da unidade. Para cumprir com este objetivo o SDCD utiliza-se de técnicas de processamento digitais (discreto) em oposição ao analógico (contínuo), com o objetivo de proporcionar uma manutenção no comportamento de um determinado processo e/ou na planta da indústria, em

<sup>13</sup> Otimização da produção pode ser definida como um campo da matemática dedicado ao desenvolvimento de métodos eficientes de determinação de máximos e mínimos de funções de uma ou mais variáveis. A ciência que determina as melhores soluções para certos problemas físicos; problemas que são descritos por modelos matemáticos (KALID, 2011).

conformidade com os parâmetros pré-estabelecidos (CAMPOS; TEIXEIRA, 2007). O sistema é dotado de processadores e redes redundantes e permite uma descentralização do processamento de dados e decisões, através do uso de unidades remotas na planta. O operador do sistema interage com a planta através de uma interface homem-máquina (IHM) que permite o acesso aos controladores PID, entre outras funções. Por meio das unidades de processamento, distribuídas nas áreas, onde os sinais dos dispositivos de campo são obtidos de acordo com a estratégia programada. Estes sinais, transformados em informação de processo, são atualizados em tempo real nas telas de operação das estações de interface homem máquina localizada fisicamente no centro integrado de controle (casa de controle). A figura 2-15 ilustra a estrutura funcional do SDCD ABB, observa-se que a estratégia de controle é elaborada através de blocos funcionais e o controlador é um objeto da biblioteca da coleção de símbolos dinâmicos da ferramenta de desenvolvimento de interface do SDCD.

Figura 2-15 – Fluxograma funcional do SDCD ABB, documento de visão dos blocos funcionais, objetos dinâmicos pertencentes à estratégia de controle.



Fonte: ABB

No caso em específico do objeto de estudo desta dissertação (forno), as estratégias de controle são executadas por um controlador MFP (Multi Function

Process), cartão eletrônico instalado em hardware da ABB. Neste tipo de aplicação (SDCD), as malhas de controle relacionadas com a manutenção da temperatura do forno dentro dos limites estabelecidos pela produção, estão contidas nos elementos de hardware (cartões de I/O e controlador MFP). O cartão de controle (MFP) disponibiliza para o usuário (projetista) uma <sup>14</sup>biblioteca de blocos funcionais, contendo as principais funções matemáticas: bloco PID, soma; raiz quadrada, linearização, exponenciação, multiplicação, logaritmo, etc.

### 2.1.6 Instrumentação de Campo

A instrumentação de campo é caracterizada por transmissores eletrônicos para medição de diferença de pressão entre a entrada e saída de gás de processo, medição de vazão gás de processo, pressão da fornalha e/ou câmara de combustão, etc. O acompanhamento da sujidade e/ou diminuição da área interna dos tubos da convecção e radiação, em consequência da deposição de partículas nas paredes (interno) do feixe de tubos, é monitorada por um transmissor de pressão diferencial. Trata-se de um instrumento importante para o acompanhamento de desempenho do forno. O aumento da perda de carga e/ou diferencial de pressão provoca uma elevação considerável no consumo de combustíveis, entre outros efeitos (SOUZA, 2008).

No caso específico das malhas do forno, o padrão de transmissão adotado é o 4 a 20 mA. No referido padrão a única informação obtida é a variável de processo em questão. Atualmente, a grande maioria dos fabricantes de tecnologia para automação industrial, disponibiliza instrumentos com funções aquisição da variável de processo, diagnóstico, log. de eventos, permitindo um acompanhamento preditivo do <sup>16</sup>ciclo de vida do dispositivo de campo. A instrumentação convencional atende

<sup>14</sup> Na ciência da computação, biblioteca é uma coleção de subprogramas e/ou algoritmos. A biblioteca contém código e dados auxiliares, que provém serviços a programas independentes, o que permite o compartilhamento e a alteração de código e dados de forma modular. Alguns executáveis são tanto programas independentes quanto bibliotecas, mas a maioria das bibliotecas não é executável. Executáveis e bibliotecas fazem referências mútuas conhecidas como *ligações*, tarefa tipicamente realizada por um ligador (HAGER; WELLEIN, 2010).

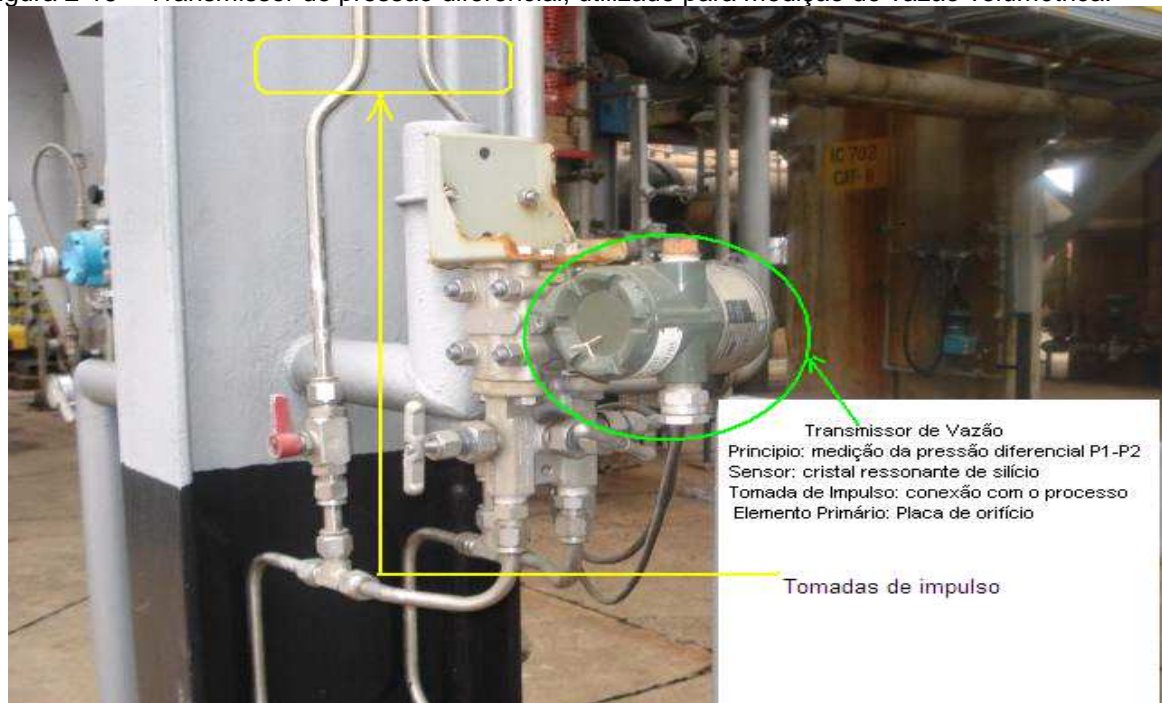
<sup>16</sup> O termo ciclo de vida útil de um dispositivo e/ou equipamento, expressa a durabilidade, na métrica temporal, ou seja, é o espaço de tempo entre a entrada em serviço desse bem e o término do ciclo de vida. O final do ciclo de vida útil é determinado pelo intervalo de tempo, que sob determinadas condições, começa num dado instante, regularmente entrada ao serviço ou função e termina quando a taxa de avarias se torna inaceitável ou quando o bem é considerado irreparável no contexto operacional, técnico ou econômico (LAFRAIA, 2011).



basicamente a aquisição da variável controlada, porém a qualidade do sinal e/ou falha na eletrônica não é passível de detecção. A instrumentação de campo utilizada para o controle de temperatura do forno foi projetada na final da década de oitenta (1989). Como destacado ao longo do texto, a instrumentação de campo é baseada no padrão de <sup>17</sup>transmissão de sinal 4 a 20 mA, sistema a dois fios (two wire), não permitindo obter outras informações, somente variável de processo.

A conexão dos transmissores e outros dispositivos de campo com o SDCC é feita através do multicabo, conectado as terminações dos cartões de I/O (entrada e saída). Este cartão é responsável pela alimentação do transmissor eletrônico, e leitura do sinal de corrente produzida pelo elemento sensor. A figura pressão diferencial é considerada um instrumento com uma larga variedade de aplicações no processo de materialização das grandezas físicas, tais como: vazão, nível, e pressão. O transmissor de pressão diferencial e mostrado na figura 2-16 e 2-17. Este instrumento é cobre uma larga faixa de aplicações, tais como: medição de vazão, pressão, medição de nível, interface entre dois líquidos de diferentes viscosidades, etc.

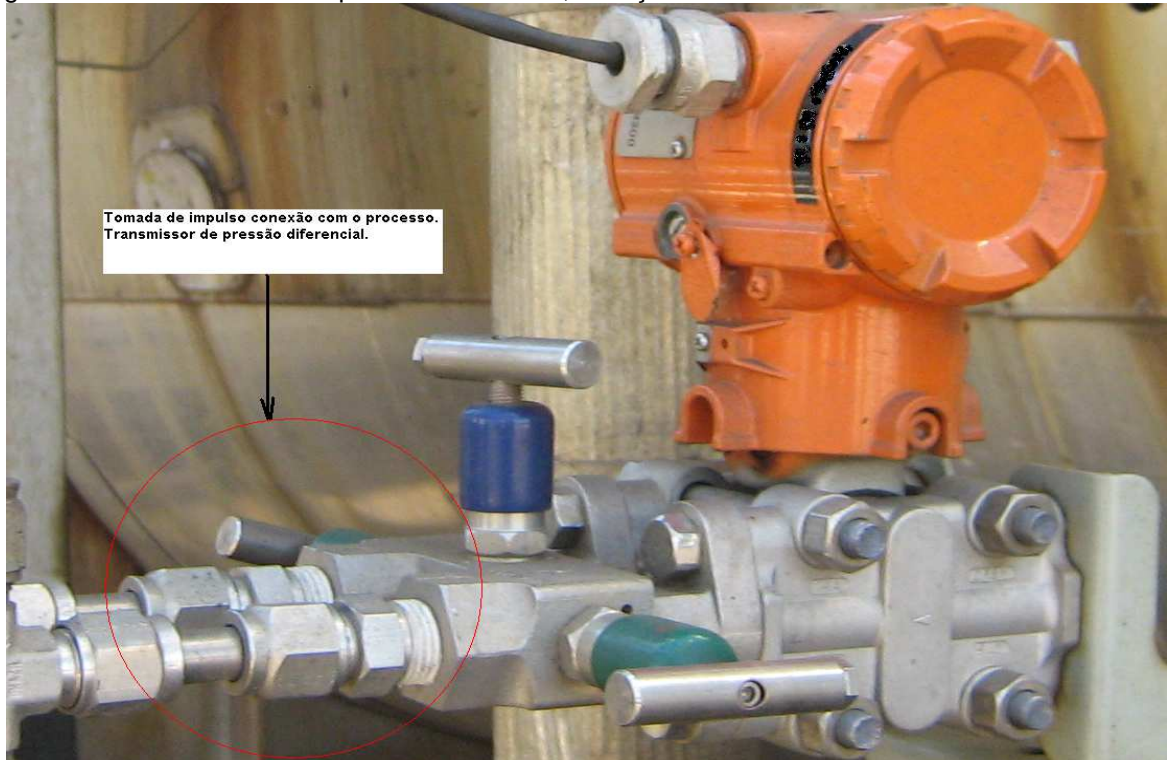
Figura 2-16 – Transmissor de pressão diferencial, utilizado para medição de vazão volumétrica.



Fonte: O autor.

<sup>17</sup> O transmissor com padrão de transmissão de 4 a 20 mA recebe o sinal do transdutor e o converte em um sinal de corrente, onde: 4mA para o valor mínimo a ser medido pelo sensor, 20mA para o valor máximo da variável de processo. Os valores intermediários normalmente são proporcionais com função de transferência linear (reta) (TRINDADE, 2006).

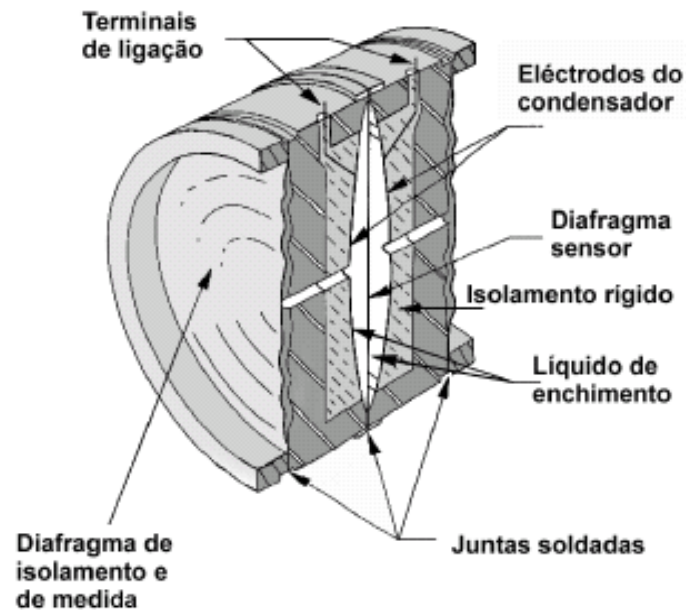
Figura 2-17 – Transmissor de pressão diferencial, medição de vazão.



Fonte: O autor.

A maioria dos fabricantes de transmissores de pressão diferencial utiliza o sensor capacitivo, como transdutor da pressão diferencial aplicada nas tomadas de impulso. O método de medição é baseado na deformação de uma membrana. O conjunto de membrana forma um capacitor, isto é, e constituído de armaduras separadas por um material dielétrico. A deformação da membrana provoca uma variação na capacitância do capacitor, transformando em uma variação de um sinal elétrico (tensão ou corrente). A Figura 2-18 representa esquematicamente a parte inferior dos transmissores de pressão diferencial, onde fica localizada a referida membrana, elemento sensor (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2007).

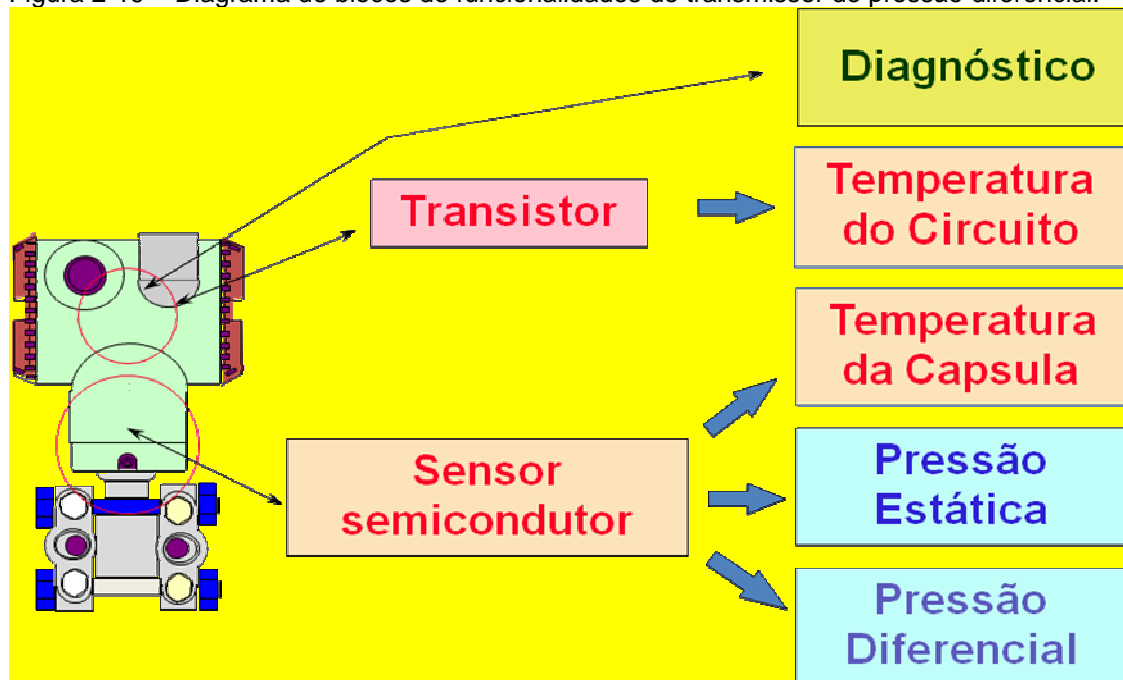
Figura 2-18 – Representação esquemática do sensor capacitivo utilizado por fabricantes de instrumentos de medição



Fonte: Chaves, (2002).

Atualmente são disponibilizados pela grande maioria dos fabricantes transmissores eletrônicos smart (inteligentes). Estes transmissores apresentam uma variedade de funções adicionais, além da função principal (medição de variáveis de processo) como: sistemas de diagnósticos de funcionalidades do equipamento, calibração remota de parâmetros, execução de estratégias de controle PID, etc. Na figura 2-19 é mostrado através de diagrama de blocos, as principais funcionalidades do transmissor de pressão diferencial.

Figura 2-19 – Diagrama de blocos de funcionalidades do transmissor de pressão diferencial.

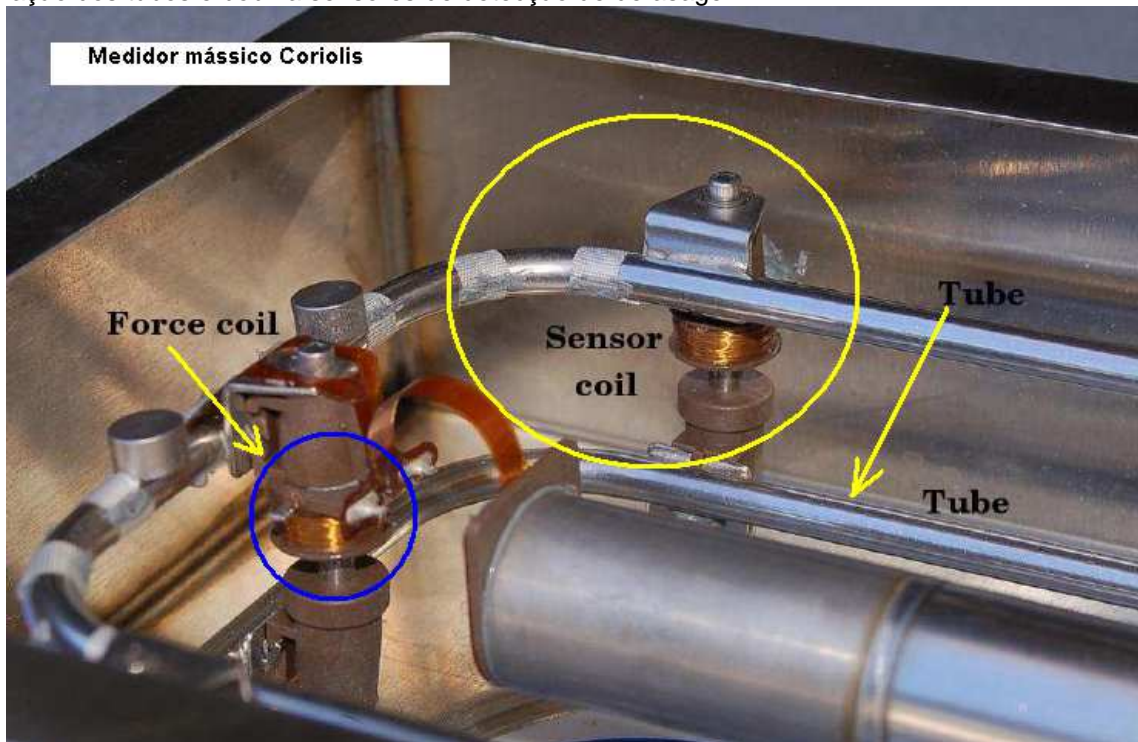


Fonte: O autor.

No caso específico da medição de vazão de óleo combustível para o sistema de combustão, o elemento primário responsável pela aquisição da variável fluxo é o transmissor do tipo coriolis. O transmissor de pressão diferencial é instalado através de tomadas de impulso conectadas a jusante (depois) da válvula de controle de vazão óleo combustível. A figura 2-20 mostra o medidor e transmissor tipo coriolis, utilizado para medição mássica de óleo combustível.



Figura 2-20 – Medidor mássico coriolis, estrutura interna, bobinas de excitação para modo de vibração dos tubos e bobina sensores de detecção de defasagem



Fonte: Kuphaldt, (2008).

### 2.1.7 Elemento Final Controle

Os elementos finais de controle utilizados no forno são: válvulas de controle tipo globo, esfera e <sup>18</sup>shunt-off. A função principal do elemento final de controle é regular o fluxo de um determinado fluido de processo. O elemento final de controle representa o braço forte da regulação. A válvula de controle constitui um mecanismo que varia a quantidade de energia ou material (agente de controle), em resposta ao sinal enviado pelo controlador (SDCD) com o objetivo de manter a variável controlada em um valor (ou faixa de valores) pré – determinado. Dentro do contexto regulatório, a válvula de controle desempenha um papel importante no controle automático do processo produtivo. No forno em questão o controle de vazão de combustíveis (óleo e gás combustível) é manipulado por válvula de controle do tipo globo.

<sup>18</sup> Válvula cujo acionamento não depende da força humana. São válvulas utilizadas para controle on-off, ou para acionamento remoto através de um sistema digital controle. Esta classe de válvula é aplicada para monitoramento e controle remoto das funções de segurança de uma planta industrial. A válvula do tipo Shunt-off, pode assumir posições em dois estados distintos: totalmente aberta ou totalmente fechada (CAMPOS; TEIXEIRA, 2007).

No caso das válvulas de controle de vazão de óleo e gás combustível, o controle é caracterizado pela troca de energia, redução de pressão ou simplesmente para transferir um determinado volume e/ou massa para os maçaricos. Neste caso, a válvula de controle fornece a necessária amplificação de forças entre os baixos níveis de energia, fornecidos pelos controladores, e os maiores níveis de energia necessários para desempenho de suas funções de variação da vazão de fluidos (CAMPOS, 2007). Há outros tipos de elementos finais de controle tais como: bombas dosadoras, dampers e louvers (variação de válvula borboleta), hélice de passo variável, motores elétricos para posicionamento de equipamentos.

A válvula de controle está sujeita a severas condições de pressão, temperatura, corrosão e contaminação, porém, deve operar satisfatoriamente dentro das condições de projeto. Em termos construtivos, a válvula de controle consiste basicamente de dois conjuntos principais: atuador, corpo e acessórios. O atuador da válvula de controle é o elemento responsável em proporcionar a <sup>19</sup>força motriz necessária ao funcionamento da válvula de controle. Sendo parte integrante do sistema de controle, ela quando corretamente selecionado, deve proporcionar meios de operacionalidade estáveis e suaves, contra a ação variável das forças dinâmicas e estáticas originadas na válvula através da ação do fluido de processo (CAMPOS, 2007). Dependendo basicamente do meio de produção da força motriz, o atuador utilizado em aplicações de controle modulado, classifica-se em três grupos principais: pneumático, elétrico e hidráulico. Na figura 2-21 é mostrada uma válvula de controle de gás combustível do tipo globo.

---

<sup>19</sup> Adjetivo: que ou aquela que faz mover, que imprime movimento motor: força motriz (FERREIRA, 2004).

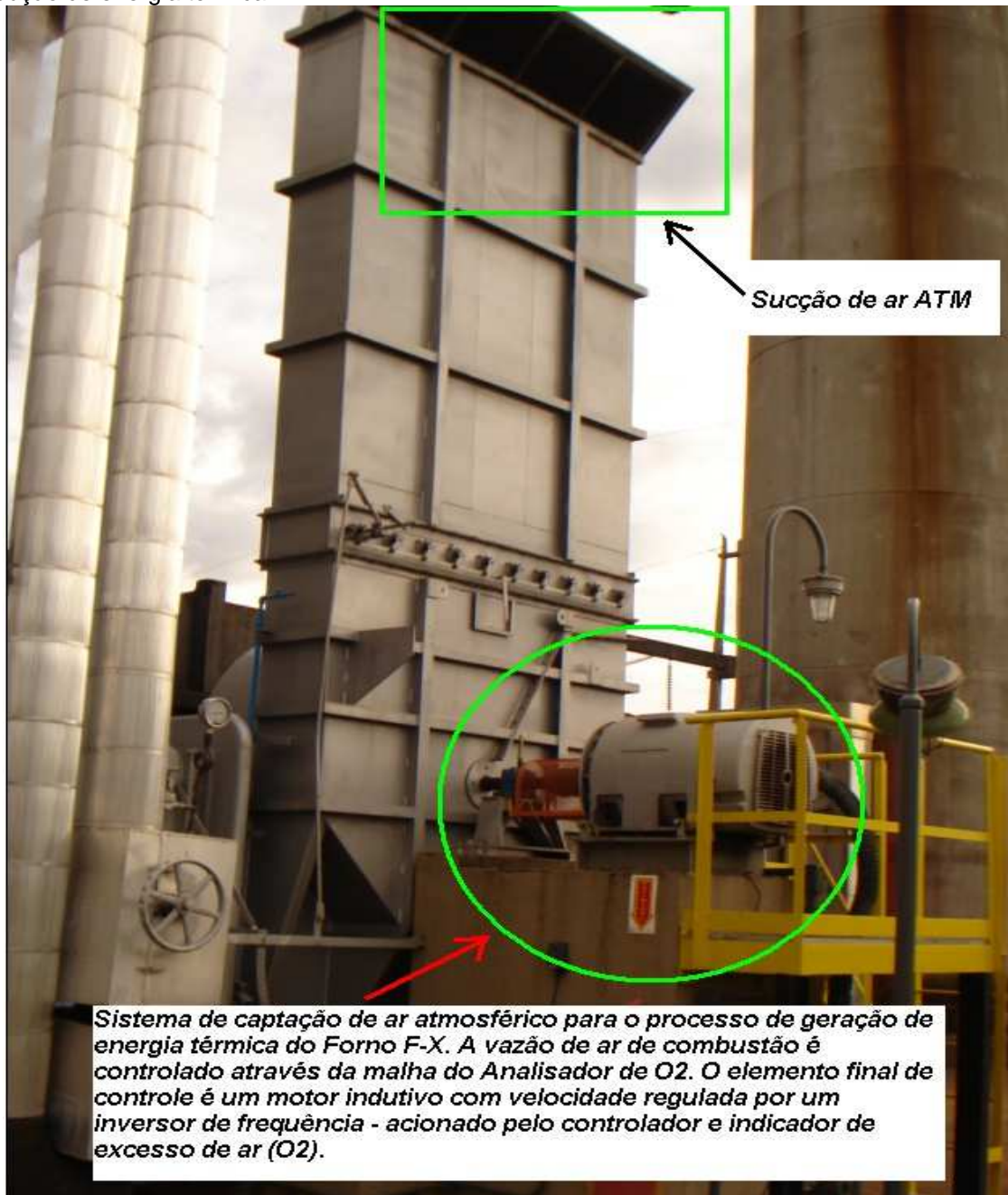
Figura 2-21 – Válvula de controle, elemento final de controle de processo.



Fonte: O autor.

O controle de vazão de ar é realizado variando a velocidade de um motor o qual esta acoplada á um soprador rotativo. Através do acionamento do inversor de frequência, a vazão de ar é incrementada e/ou decrementada, de acordo com a demanda de carga térmica. Neste caso o conjugado motor e soprador são considerados elementos finais de controle. Na figura 2-22 é disponibilizada a imagem do conjunto soprador e motor.

Figura 2-22 – Conjuguado motor e soprador de ar atmosférico para processo de combustão e produção de energia térmica



Fonte: O autor.

### 2.1.8 Elemento Primário

A placa de orifício é considerada um dos elementos utilizados em larga escala na indústria de química, petroquímica, alimentícia, etc. A justificativa para este fato é devido ao baixo custo de fabricação, instalação, e um erro na ordem  $\pm 1\%$  final da faixa de medição. A placa de orifício é utilizada para propiciar a obtenção da grandeza relacionada com quantidades de um determinado líquido gás e/ou fluido. É



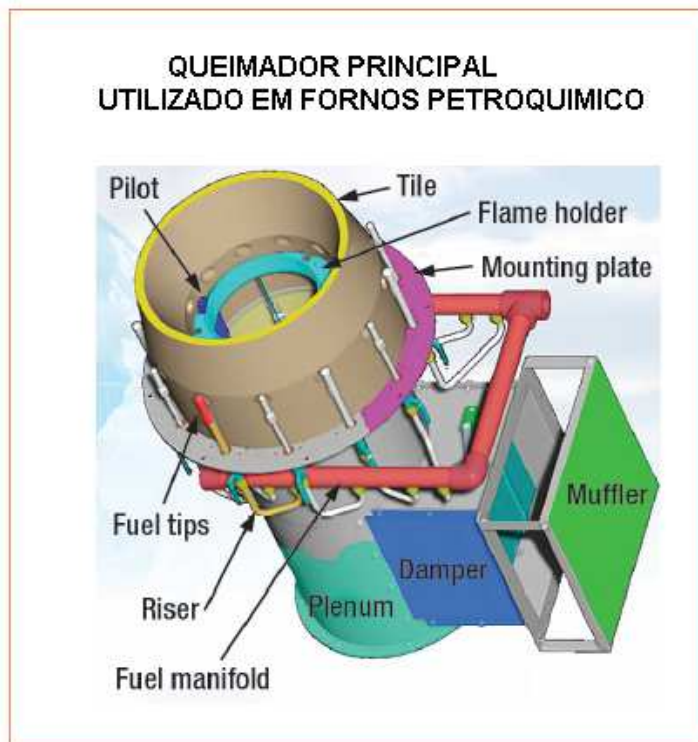
considerado um elemento primário também conhecido como elemento deprimogênio. Dentre as diversas técnicas de inferência da variável vazão, o método de medição por meio de placa de orifício é considerado o mais difundido (clássico) (CAMPOS; TEIXEIRA, 2007).

#### **2.1.9 Sequenciamento da Operação do Forno: acendimento e sistema de proteção de chama do processo de combustão**

Como destacado ao longo do capítulo dois, as principais variáveis de um forno industrial petroquímico são a temperatura de saída do gás de processo, a vazão de fluido de processo através dos feixes de tubos (radiação e convecção) e a carga térmica a ser fornecida pelo sistema de controle de combustíveis. O controle da temperatura de saída do gás de processo é mantido através da manipulação da vazão de combustíveis. Em determinadas configurações construtivas o sistema de queima (queimador) é restritivo quando ao limite da pressão de operação, ou seja, a estratégia de controle alguns adotada é regular a pressão do maçarico, em vez de manipular a vazão de combustível. Esta filosofia de controle, leva em consideração a proteção do sistema contra o apagamento da chama por pressão baixa e/ou pressão muito alta por efeito de deslocamento de chama (BRASIL, 1996).

Os queimadores são equipamentos que podem apresentar configurações de instalação diferentes, dependendo do tipo de forno. Os dispositivos de queima de combustíveis podem estar dispostos na região do piso do forno, nas laterais, na parte superior do forno (teto) ou em uma combinação destes arranjos construtivos. Como consequência, destas configurações, torna-se necessário criar estratégias de controle que permitam fornecer energia térmica específica por regiões do forno (SILVA, 2004). Na figura 2-23 é mostrado um queimador para combustíveis fósseis. Este equipamento é dotado de queimador piloto, sistema de ignição, dampers de entrada de ar para combustão, e é o modelo encontrado na grande maioria dos fornos petroquímicos.

Figura 2-23 – Queimador de forno industrial petroquímico



Fonte: Baukal e Schwartz, (2001).

O queimador é responsável pela liberação de energia térmica (calor) processo de aquecimento do gás de processo. Esta energia térmica é liberada através do processo de combustão de um ou mais combustíveis. No caso específico do forno F-X o equipamento conta com doze queimadores instalados no teto do forno, a queima é combinada, ou seja, óleo é gás combustível. Quanto ao tipo de combustível líquido óleo, este recebe um jato de vapor (atomização) de maneira a nebulizar este combustível de maneira a obter fluidez para posterior queima.

O processo de <sup>20</sup>atomização é considerado importante requisito para o equilíbrio estequiométrico de queima de combustíveis e comburentes, uma nebulização incompleta reflete na baixa eficiência do queimador com relação à geração de energia térmica (SOUZA, 2008).

Os queimadores do forno, objeto de estudo, contam com um sistema de acendimento, trata-se de maçaricos pilotos com ignitores. O equipamento de ignição produz a centelha (energia térmica) necessária para acendimento dos pilotos. Este dispositivo é alimentado por um transformador de alta tensão. Faz parte do sistema

<sup>20</sup> Yule (1996 apud SOUZA, 2008) define atomização como a ação de instabilização e quebra do contínuo líquido, ou seja, a ruptura da superfície contra as tensões superficiais e a dissipação de energia através das forças viscosas, transformando a corrente líquida em filmes e ligamentos instáveis, gotas e finalmente gotículas.

de proteção do sistema de acendimento, um conjunto de detectores de chama instalados em cada piloto.

Os detectores de presença de chama (fotocélulas) são responsáveis pela verificação da existência de chama no maçarico piloto para posterior liberação de ignição do queimador principal. Esta medida visa garantir o acendimento do queimador principal sobre condições controladas e estáveis, não impondo risco ao operador do forno.

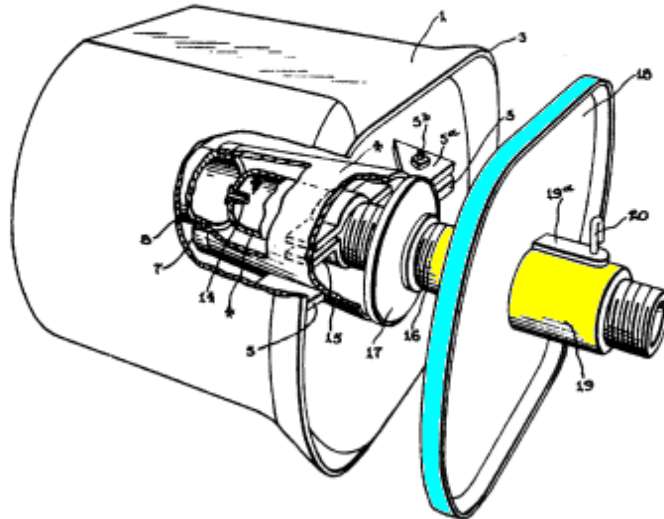
Toda a lógica sequencial partida (entrada em operação) do forno, acendimento do queimador principal e maçarico piloto, são executados no PES (equipamento de proteção de processo). Trata-se de um controlador lógico programável com nível de integridade e tolerância a falha compatível com ao risco operacional. Os sinais de comando de partida e/ou parada do forno são oriundos do PES.

Há uma interconexão entre o Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD) e o PES, o operador de sala de controle poderá desligar e/ou liberar o processo de partida (entrada em operação) do equipamento, através da console de operação (IHM). Esta interligação entre os equipamentos é realizada por conexão discreta. Funções de sinalização de status de operação (pressão alta de óleo combustível, vazão baixa de gás ou ar, queimador apagado, etc.) é desenvolvida no PES e enviada para SDCD, através da comunicação de rede SDCD-PES, outras indicações disponíveis no PES são enviadas para a interface do SDCD.

Na parte superior do forno há disponível um painel local junto aos queimadores. Nestes painéis está alojado o sistema de comando local, para sequenciamento de acendimento do queimador. O controlador de chama, equipamento responsável pela amplificação e intertravamento do sistema de acendimento do piloto e queimador, esta instalado no painel local. O sensor de chama é conectado diretamente ao controlador (relé de chama), equipamento responsável pela validação da condição operacional do sensor de chama. Na figura 2-24 e mostrado um sensor de chama, utilizado no sistema de proteção de chama da queimador.

Figura 2-24 – Sensor de Chama, dispositivo do sistema de proteção de chama, intertravamento de segurança e acendimento do sistema de combustão

### SENSOR DE CHAMA



Fonte: Baukal e Schwartz, (2001).

O sistema de combustão constituído pelo queimador, sistema de proteção de chama, malhas de controle de vazão de ar e combustíveis devem operar sobre condições estáveis, visando o aproveitamento da energia térmica disponibilizada pela reação de oxidação (chama) e baixa emissão de poluentes. A combustão incompleta é caracterizada pela insuficiência de oxigênio, e/ou excesso de combustível. Com a falta de oxigênio não é possível consumir todo o combustível. No processo reação de oxidação de compostos orgânicos, os produtos da combustão incompleta são monóxido de carbono (CO) e água (H<sub>2</sub>O) ou carbono elementar (C) e água (H<sub>2</sub>O).

Em determinadas situações de um processo de combustão incompleta o carbono pode torna-se visível, ou seja, é possível observar a deposição deste elemento nas paredes dos tubos da radiação e convecção e/ou através da fumaça que sai da chaminé (fumaça escura, formada de minúsculas partículas sólidas de carbono). Além da formação de partículas e compostos indesejáveis no circuito de combustão, a queima incompleta pode provocar o desgaste de componentes do queimador. Este desgaste está associado e/ou relacionado com deslocamento da chama (turbulência), formação de resíduo o qual fica aderente no bico dos maçaricos, etc. Na figura 2-25 é possível visualizar as condições de degradação dos

dispositivos do queimador de óleo e gás em função de problemas com a queima incompleta.

Figura 2-25 – Maçarico principal de queima de óleo e gás combustível, deterioração e deposição de particulado (carbono) em função de problemas com a combustão, queima incompleta

**Maçarico de óleo e gás combustível, desgaste e deposição de material particulado.**



Fonte: Baukal e Schwartz, (2001).

Quanto ao sistema de intertravamento de operação do forno, prevê o trip (parada de operação do forno) em caso de vazão baixa de gás de processo, falha de chama dos queimadores centrais, entre outras (SILVA, 2004).

### 3 ESTADO DA ARTE

Este capítulo tem como propósito descrever os aspectos relevantes relativos a estratégias de controle descritas na literatura, aplicada em sistemas de combustão, com o propósito de contribuir com a melhoria de desempenho da eficiência energética de sistemas indústrias. A organização deste capítulo está por ordem cronológica em relação aos principais autores na área de controle automático de processos industriais.

No capítulo 3.1 Revisão Bibliográfica, 3.1.1 Controle Regulatório PID para Processo de Combustão de Fornos e Caldeiras, 3.1.2 Fundamentação da Lógica Fuzzy, 3.1.3 Teoria de Conjuntos Fuzzy, 3.1.4 Teoria de Conjuntos Fuzzy Regras Linguísticas Fuzzyficação, 3.1.5 Motor de Inferência Fuzzy, 3.1.6 Método de Defuzzyficação, 3.1.7 Modelo Básico Controlador Fuzzy, 3.1.8 Sintonia de Parâmetros de Controladores PID Fuzzy, 3.1.9 Controle Regulatório PID Fuzzy, 3.1.10 Algoritmos Genéticos Aplicados no Controle Regulatório PID Fuzzy, 3.1.11 Estratégias de Controle Preditivo, 3.1.12 Controle Preditivo MPC, 3.1.13 Controle Preditivo DMC, 3.1.14 Controle Preditivo Generalizado (GPC), 3.1.15 Estratégias de Controle Preditivo Aplicado a Processos Térmicos, 3.1.16 Considerações.

#### 3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em 1788, o matemático e engenheiro James Watt construiu o primeiro regulador centrífugo (*Flyball Governor*), aplicado em máquinas a vapor.

No ano de 1868 o físico e matemático J.C. Maxwell, publicou o artigo científico com título “*On governors*”. Neste *paper* Maxwell analisava a estabilidade de sistemas dinâmicos a partir de equações diferenciais. A metodologia utilizada por Maxwell consistia em linearizar as equações de movimento de forma a sintetizar equação característica. De posse da equação característica, Maxwell evidenciava se o comportamento do sistema manter-se-ia estável. Desta forma, caso as raízes da equação característica possuíssem partes reais negativas considerava-se estável (SANTOS, 2005, p. 11-18).

No ano de 1893, matemático e físico russo Aleksandr Mikhailovich Lyapunov publicou um dos trabalhos importantes para o embasamento da teoria moderna de controle regulatório, no qual avalia a estabilidade de equações diferenciais não

lineares usando uma noção generalizada de energia (SANTOS, 2005). Os trabalhos de Lyapunov ficaram restritos para aplicações específicas de cunho prático na antiga União Soviética. No período compreendido entre 1892 e 1898, o engenheiro britânico O. Heaviside introduz o conceito de função transferência (LEWIS, 1992)

Em 1922 o pesquisador e engenheiro mecânico Nicolas Minorsky desenvolveu o controle automático de direção de navios intitulado “*Directional Stability and Automatically Steered Bodies*” (1937). Os testes foram realizados no Novo México, com acompanhamento de Minorsky e patrocinado pelo instituto Bureau de construção da marinha dos EUA. De 1923 a 1934, Minorsky trabalhou na Universidade da Pensilvânia como professor no campo da eletrônica e da física aplicada. Considera-se como a primeira publicação científica relacionada com a teoria de controle, o desenvolvimento de um dispositivo regulatório para reposicionamento automático de um telescópio com realimentação. O dispositivo de reposicionamento (Telescópico) foi projeto pelo astrônomo, G. B. Airy, do observatório Real de Greenwich no ano de 1840 (AIRY, George Biddell; AIRY, Wilfrid, 1896).

Segundo Santos (2005) “até o final do século XIX, a abordagem de controle era feita com equações diferenciais no domínio do tempo”. Historicamente, o projeto de Nicholas Minorsky, introduziu os três termos da lei de controle que são referenciados até os dias de hoje como controle PID (LIANGHONG et al., 2005).

O controlador <sup>21</sup>PID é considerado o algoritmo regulatório mais utilizado em processos industriais durante os últimos 50 anos. Cronologicamente é possível destacar que a aplicação efetiva dos controladores PI e PID para solução de problemas regulatórios na indústria tiveram os seguintes marcos temporais:

- 1931: Foxboro Model 10 *Stabilog: PI*.
- 1933: Taylor lança controlador *Double-Response* • 1939: Taylor Model 100 *Fullscope: PID* (Proporcional, reset e pre-act), totalmente ajustável.
- 1939: Foxboro incorpora *Hyper-reset* (Model 10 *Stabilog*), tornando-o PID. Somente P ajustável quatro ajustes fixos de I+D.

---

<sup>21</sup> A combinação das ações de controle proporcional, integral e ação derivativa são denominadas ação de PID. O controlador PID também conhecido como controlador de três termos (ASTRÖM, WITTENMARK, 1997).

Apesar das diversas opções de sistemas e algoritmos de controle o controlador PID é utilizado em plantas de pequeno porte e/ou com poucas malhas regulatórias (CAMPOS; TEIXEIRA, 2007). Trata-se de uma solução de controle atrativa para automatização de unidades de processo com uma quantidade reduzida de malhas de controle, é considerada uma solução econômica atrativa devido à inexistência de licença de software, custo atualização <sup>22</sup>firmware, fácil parametrização, etc.

### 3.1.1 Controle Regulatório PID para Processo de Combustão de Fornos e Caldeiras

O controlador PID clássico é aplicado em diversas situações onde se faz necessário a manutenção da variável de processo (PV), dentro dos limites pré-determinado, destacando-se como o primeiro algoritmo de controle aplicado para solução com de sistemas com realimentação (SEBORG; EDGAR; MELLICHAMP, 1989).

De maneira geral o controlador PID é aplicado em sistemas SISO (*single input, single output*), onde há existência de uma variável controlada e uma variável manipulada. Em relação ao modelo matemático de um controlador PID este é constituído de um conjunto de ações: proporcional, integral e derivativa, gerando o sinal para a manipulação do elemento final de controle. A variável manipulada representa a entrada  $u(t)$ , e a saída  $y(t)$  (GARCIA, 1997).

Na figura 3-1 visualiza-se o diagrama de blocos de um controlador PID com realimentação negativa através da variável  $y(t)$  e set-point  $u(t)$ , ações de controle proporcional  $K_p e(t)$ , integral  $K_i \int e(t) dt$  e termo derivativo  $K_d de(t)/dt$ . A combinação das três ações permite, simultaneamente, reduzir o erro estacionário e satisfazer as exigências relativas ao amortecimento e estabilidade da variável controlada (SEBORG; EDGAR; MELLICHAMP, 1989).

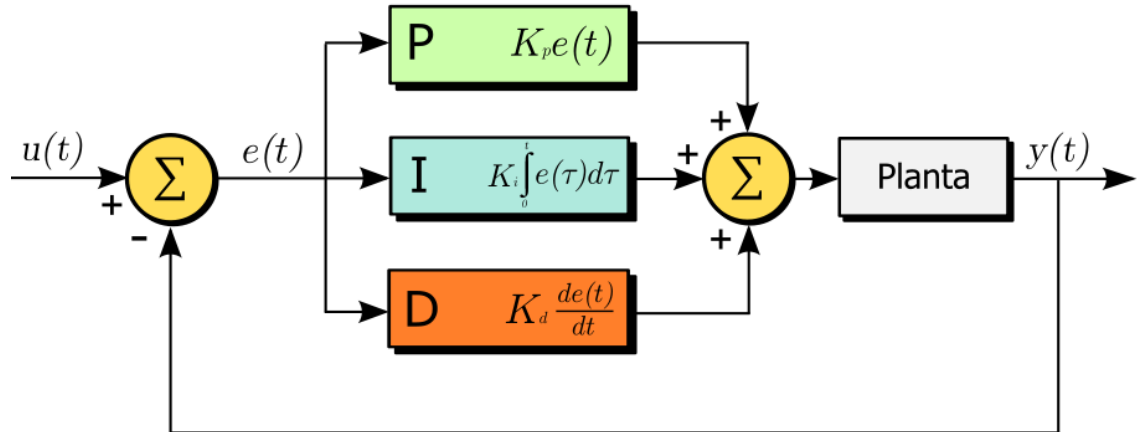
É relevante destacar que cerca de 80% a 90% dos problemas relacionados com controle regulatório podem ser solucionados com a utilização do controlador

<sup>22</sup> Em eletrônica e computação, firmware é o conjunto de instruções operacionais programadas diretamente no hardware de um equipamento eletrônico. É armazenado permanentemente num circuito integrado (chip) de memória de hardware, como uma ROM, PROM, EPROM ou ainda EEPROM e memória flash, no momento da fabricação do componente (TANENBAUM, 2008).



PID, porém, a manutenção da estabilidade do controle depende diretamente das características do processo (ASTRÖM; WITTENMARK, 1997).

Figura 3-1 – Diagrama de blocos de um controlador PID com realimentação negativa



Fonte: O autor.

Contudo o desempenho do controlador PID, apresenta limitações quando aplicado em processo não lineares (ASTRÖM, WITTENMARK, 1997). Outra característica dos controladores PID refere-se ao comportamento na configuração de realimentação negativa, ou seja, a atuação somente ocorre quando existe a presença de erro diferença entre valor desejado (SP) e variável controlada (PV) (MORAES; CASTRUCCI, 2001). O controle PID não prevê alterações no comportamento futuro em relação ao processo e/ou mudança da função de transferência.

Ainda sobre o comportamento regulatório do controlador PID, o mesmo é caracterizado de duas maneiras: quando há uma variação do tipo degrau na referência (Problema Servo) ou quando ocorre uma perturbação (Problema Regulador), ou seja, quando o set-point é mantido constante o problema é de regulação. Contudo quando o operador do sistema, implementa mudanças no set-point (referência) o problema é de comportamento servo. Entretanto, a literatura de controle continua mostrando diferentes estruturas de controle PID para superar limitações teóricas e dinâmicas (ASTRÖM; HAGGLUND, 2004).

Consideram-se como aspecto relevante durante a fase de projeto da estratégia de controle, as características inerentes do processo, tais como: atraso de transporte (tempo morto), sistema de primeira ordem e/ou segunda ordem, identificação da variável controlada e manipulada. Outro aspecto relevante que

deverá ser considerado durante a fase de projeto do controlador é em relação ao comportamento do processo, a aplicação do controlador PID com realimentação negativa, poderá introduzir uma instabilidade na planta, a qual induzirá em outras malhas um comportamento instável (OGATA, 1998).

Em se tratando de fornos petroquímicos e caldeiras, observa-se a utilização de controladores PID no processo regulatório aplicado a malhas de temperatura do gás de processo, vazão de combustíveis, excesso de ar, pressão da fornalha, etc.

Tipicamente estas malhas operam de modo SISO (*single input, single output*). Em virtude da configuração e/ou estratégia de controle em malhas de controle *single loop*, as perturbações de carga e/ou mudança de set-point, introduzem variações significativas nos demais loops de controle (malha de controle).

As estratégias de controle relacionadas com o processo de combustão são de modo geral: controle razão, limites cruzados, antecipatório e *split-range* (BEGA, 2003).

Aspectos relacionados ao desgaste e/ou termino do ciclo de vida útil de elementos finais de controle (válvula, atuadores, acionadores), sujidade interna dos tubos com aumento do diferencial de pressão de processo, entre outros, evidencia uma mudança da <sup>23</sup>função de transferência e/ou modelo matemático do processo. Nestas situações o controlador PID, não é capaz de identificar a mudança do comportamento dinâmico relacionado com a função de transferência, ou seja, comprometendo sobre maneira a estabilidade da planta.

Os parâmetros das ações proporcional, integral e derivativa, ajustadas inicialmente para uma determinada função de transferência (modelo matemático), perderão o efeito regulatório para a nova dinâmica de processo (CAMPOS; TEIXEIRA, 2007).

---

<sup>23</sup> A função de transferência de um sistema linear invariante no tempo é definida como sendo a relação da transformada de Laplace da saída (função resposta) para a transformada de Laplace da entrada (função excitação), considerando-se nulas todas as condições iniciais. Na teoria de controle, funções denominadas “funções de transferência” são usadas para caracterizar as relações entrada-saída de sistemas lineares invariáveis no tempo. O conceito de função de transferência aplica-se somente a sistemas lineares invariáveis no tempo, embora possa ser estendido a certos sistemas de controle não lineares (OGATA, 1998).

### 3.1.2 Fundamentação da Lógica Fuzzy

A teoria Fuzzy foi introduzida em 1965 pelo pesquisador Lotfali Askar Zadeh, da Universidade da Califórnia em Berkeley, inicialmente para tratar de informações com determinado grau de subjetividade (ANTUNES; PEREIRA; FILETI, 2005). Em relação à palavra Fuzzy esta tem significado de: incerto, nebuloso, impreciso. Em um primeiro momento, o conceito de conjuntos Fuzzy/ou lógica Fuzzy encontrou forte resistência por parte da comunidade acadêmica, no entanto, em curto período de tempo conseguiu a adesão de figuras importantes no universo científico.

A lógica Fuzzy consiste em aproximar a decisão computacional em relação a decisão humana. O problema é resolvido através de ponderações e a decisão de uma máquina lógica não se resume apenas a um “sim” ou um “não”, mas em decisões “abstratas”, do tipo “um pouco mais”, “talvez sim”, e outras tantas variáveis que representem as decisões humanas. É um modo de interligar inerentemente processos analógicos que se deslocam através de uma faixa contínua para um sistema digital com valores numéricos bem definidos (valores discretos) (HIROTA, 1995).

A lógica Fuzzy<sup>24</sup> inteligência artificial (IA) têm pelo menos um objetivo comum: desenvolver através de sistemas computacionais, métodos que possam executar raciocínio e resolver problemas e tarefas que requerem inteligência humana. No entanto, a lógica Fuzzy tem um objetivo adicional, isto é, explorar uma troca efetiva entre precisão e custo no desenvolvimento de um modelo aproximado de um sistema complexo ou função. Embora a questão do custo não foi considerado um problema para o trabalho de Lotfali Zadeh (PERRY, 1995). Segundo Kaufmann e Gupta (1988), a lógica Fuzzy é a combinação de conceitos e técnicas fundamentadas no processo do raciocínio intuitivo humano caracterizado pela imprecisão e ambiguidade. A Lógica Fuzzy foi inicialmente construída a partir dos conceitos já estabelecidos de lógica clássica; operadores foram definidos à semelhança dos tradicionalmente utilizados e outros foram introduzidos ao longo do

---

<sup>24</sup>A definição de Inteligência Artificial segundo Minsky (1986) é “O ato de forçar definições para as coisas que nós não entendemos geralmente causa mais danos do que benefícios. Além disso, apenas em lógica e matemática é que as definições detêm perfeitamente os conceitos. As coisas com as quais lidamos na vida prática são freqüentemente muito complicadas para permitirem uma representação clara baseada em expressões compactas. Em todo caso, não podemos nos privar de buscar uma definição para as coisas, no sentido de entender o que elas são”.

tempo, muitas vezes por necessidades de caráter eminentemente prático (GOMIDE; GUDWIN; TANSCHKEIT, 2010).

### 3.1.3 Teoria de Conjuntos Fuzzy

A teoria dos Conjuntos Fuzzy é em grande parte uma extensão da teoria dos Conjuntos Tradicionais. Um Conjunto Fuzzy é definido em um universo de discurso (conjunto base)  $X$ , e caracterizado pela sua função de pertinência. Existem três métodos através do qual um conjunto  $A$  sobre o conjunto universo  $X$  pode ser definido. Um conjunto  $A$  cujos membros são  $a_1, a_2, a_3$  é geralmente definido pela expressão em 3-1:

$$A = \{a_1, a_2, a_3\} \quad (3-1)$$

onde  $A(x)$  representa o grau com que  $x$  pertence a  $A$  e expressa a extensão com que  $x$  se enquadra na categoria representada por  $A$ , ou seja, uma função de pertinência particular (ARABSHAH, 1998). Um conjunto também pode ser definido em 3-2:

$$A = \{x|P(x)\}, \quad (3-1)$$

onde o símbolo  $|$  denota a frase tal que, e  $P(x)$  designa a proposição da forma  $x$  tem a propriedade  $P$  (AUTOR, ano). Isto é,  $A$  é definido por esta notação como o conjunto de todos os elementos de  $X$  para qual a proposição  $P(x)$  é verdadeira. Um conjunto é definido por uma função geralmente chamada de função característica, a qual declara quais os elementos de  $X$  são pertencentes do conjunto e os que não estão incluídos neste conjunto e/ou região de domínio. Um determinado conjunto denominado de  $A$  é definido por sua função característica,  $\gamma_A$  representada em (3-2).

$$\gamma_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{para } x \in A \\ 0 & \text{para } x \notin A \end{cases} \quad (3-2)$$

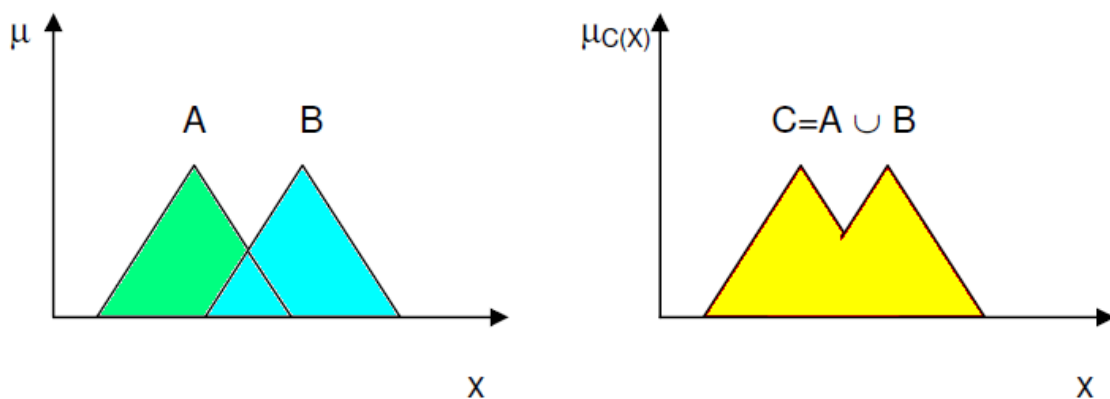
No caso um conjunto não contenha nenhum membro, este é considerado conjunto vazio e representado por  $\emptyset$ .

Dentre as operações utilizadas na teoria dos conjuntos tradicionais pode-se destacar a *união* representada por  $\cup$ , *intersecção* representado por  $\cap$  e o *complemento* representado por  $\neg$ . A união dos conjuntos  $A$  e  $B$  são denotadas pela expressão 3-4:

$$A \cup B = \{x | x \in A \text{ ou } x \in B\} \quad (3-3)$$

Na figura 3-2 e exemplificado a operação união, ou seja, os subconjuntos Fuzzy  $A$  e  $B$ , com funções de pertinência  $\mu_A$  e  $\mu_B$ . A união entre os dois subconjuntos é um subconjunto “Fuzzy”, tal que sua função de pertinência é definida como:

Figura 3-2 – Operação de União entre subconjuntos Fuzzy



Fonte: Padilha, (2001).

Esta operação pode ser considerada como a soma de dois conjuntos. A intersecção de dois conjuntos  $A$  e  $B$  são denotadas pela expressão 3-5:

$$A \cap B = \{x | x \in A \text{ e } x \in B\} \quad (3-5)$$

O complemento representa os elementos que não fazem parte de um conjunto na expressão 3-6:

$$\neg A = \{x | x \in X \text{ e } x \notin A\} \quad (3-4)$$

As operações de união, intersecção e complemento de conjuntos Tradicionais possuem várias propriedades, algumas delas sumarizadas nos elementos  $B$  e  $C$  pertencentes aos conjuntos tradicionais definidos sobre um universo  $X$  (ARABSHAHI, 1998). Definidos os conceitos dos conjuntos Tradicionais, serão definidos os conceitos dos conjuntos Fuzzy na tabela 3-1.

Tabela 3-1 – Propriedades e Conjuntos Fuzzy

Nº	Propriedade	Representação
01	Absorção	$A \cup (A \cap B) = A$ $A \cap (A \cup B) = A$
02	Absorção por $X$ e $\emptyset$	$A \cup X = X$ $A \cap \emptyset = \emptyset$
03	Associatividade	$A \cup (B \cup C) = (A \cup B) \cup C$ $A \cap (B \cap C) = (A \cap B) \cap C$
04	Comutatividade	$A \cup B = B \cup A$ $A \cap B = B \cap A$
05	Distributividade	$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$ $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$
06	Idem potência	$A \cup A = A$ $A \cap A = A$
07	Identidade	$A \cup \emptyset = A$ $A \cap X = A$
08	Involução	$\neg \neg A = A$
09	Lei de Contradição	$A \cap \neg A = \emptyset$
10	Lei De Morgan's	$\neg(A \cup B) = \neg A \cap \neg B$ $\neg(A \cap B) = \neg A \cup \neg B$
11	Lei do Meio Excluído	$A \cup \neg A = X$

Fonte: O autor.

Além das operações e das relações os conjuntos Fuzzy possuem algumas características especiais. Entre tais características destacam-se: corte  $\alpha$ , conjunto de níveis, suporte, altura e normalização. As características citadas são apresentadas de forma sintética, supondo que  $A$  é um conjunto Fuzzy sobre o conjunto base.

### **Corte $\alpha$**

O Corte  $\alpha$  ( ${}^\alpha A$ ) de um conjunto Fuzzy  $A$  corresponde ao conjunto tradicional que contém todos os elementos do conjunto universo  $X$  com grau de pertinência em  $A$  maior ou igual a  $\alpha$ , enquanto que o Corte  $\alpha$  forte ( ${}^{\alpha+} A$ ) contém todos os elementos em um conjunto universo  $X$  com grau maior que  $\alpha$ , onde  $\alpha \in [0,1]$ , onde as expressões 3-7 e 3-8:

$${}^{\alpha}A = \{x \in X \mid A(x) \geq \alpha\} \quad (3-7)$$

$${}^{\alpha+}A = \{x \in X \mid A(x) > \alpha\} \quad (3-8)$$

### Conjunto de Níveis

O conjunto de níveis ( $\Lambda$ ) de um conjunto Fuzzy  $A$  corresponde a um conjunto que contém todos os valores  $\alpha \in [0,1]$  e que representam corte  $\alpha$  de  $A$  distintos. O conjunto de Níveis do conjunto Fuzzy  $A$  é representado formalmente na expressão 3-9.

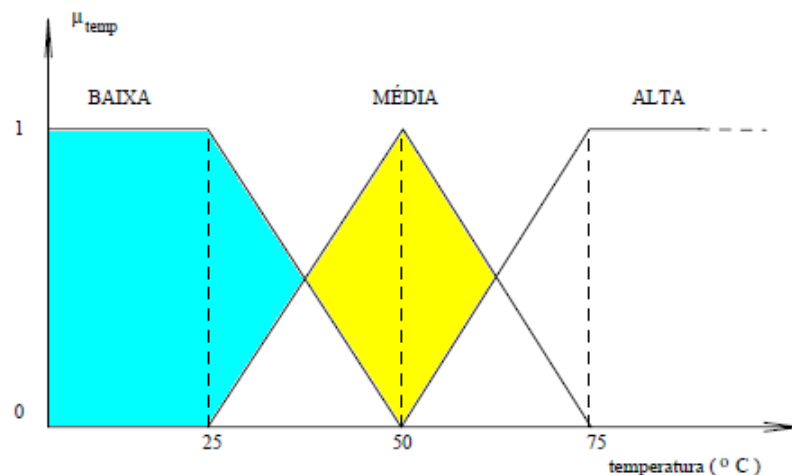
$$\Lambda A = \{\alpha \mid A(x) = \alpha \text{ para algum } x \in X\} \quad (3-9)$$

### 3.1.4 Teoria de Conjuntos Fuzzy Regras Linguísticas Fuzzyficação

Em um controlador Fuzzy baseado em regras, a estratégia de controle é descrita por intermédio de regras linguísticas que conectam, de modo impreciso, várias situações com as ações a serem tomadas, ou seja, do tipo SE. ENTÃO, e implementadas como implicações lógicas através da utilização das propriedades e técnicas.

Uma variável linguística é uma variável cujos valores são nomes de conjuntos Fuzzy. A temperatura de um determinado processo (Forno-X) poderia ser uma variável linguística assumindo valores entre *baixa*, *média*, *alta*, etc. A figura 3-3 exemplifica o conceito de variável linguística, (GOMIDE; GUDWIN; TANSCHKEIT; 2010).

Figura 3-3 – Variável temperatura, conceito de variável Linguística.



Fonte: Gomide, Gudwin, Tanscheit, (2010).

Estes valores são descritos por intermédio de conjuntos Fuzzy. As principais regras de inferência são expressas por declarações condicionais, tais como:

1ª - SE duração = longa E qualidade = alta ENTÃO risco = médio

2ª - SE duração = média E qualidade = alta ENTÃO risco = baixo

3ª - SE duração = curta E qualidade = baixa ENTÃO risco = baixo

4ª - SE duração = longa E qualidade = média ENTÃO risco = alto

Em relação à estrutura básica de um controlador Fuzzy, esta é dividida em etapas.

A primeira etapa é a Fuzzyficação, a qual consiste em transformar os valores numéricos em graus de pertinência para um valor linguístico.

Cada valor de entrada terá um grau de pertinência em cada um dos conjuntos difusos. O tipo e a quantidade de funções de pertinência usados em um sistema dependem de alguns fatores tais como: precisão, estabilidade, facilidade de construção. Ainda sobre as definições das funções de pertinência de cada variável, diversos tipos de espaço podem ser gerados. Os mais comuns são: Triangular, Trapezoidal, Singleton e Shouldered. Estas funções incorporam: definição das proposições, análise das regras, criação da região resultante (GOMIDE; GUDWIN; TANSCHIT; 2010).

A segunda etapa do controlador Fuzzy é constituída do algoritmo de inferência. Esta etapa consiste na agregação, composição, fase na qual as proposições (regras) são definidas e depois são examinadas paralelamente.

### **3.1.5 Motor de Inferência Fuzzy**

O algoritmo de controle de inferência e/ou motor de inferência utiliza as regras disponíveis no banco dados de conhecimento Fuzzy em resposta ao comportamento do processo, para tomada de decisão sobre a próxima entrada do processo.

A base de conhecimento codifica o conhecimento do especialista por meio de um conjunto de regras de controle Fuzzy (ARBEX, 1994). Uma regra de controle Fuzzy é uma declaração condicional da forma SE (conjunto de condições satisfeitas) ENTÃO o qual o antecedente é uma condição em seu domínio de aplicação, o consequente é uma ação de controle a ser aplicada no sistema controlado e tanto o



antecedente como o consequente são associados com conceitos Fuzzy, isto é, termos linguísticos. Assim, a base de conhecimento é composta por dois componentes: Base de dados e Base de regras. A base de dados contém as definições dos rótulos linguísticos das regras de controle Fuzzy, isto é, as funções de pertinência dos conjuntos Fuzzy especificando o significado dos termos linguísticos (CORDÓN; HERRERA; VILLAR, 2001).

A base de regras é constituída pela coleção de regras de controle Fuzzy representando o conhecimento do especialista. Há diferentes tipos de regras propostas na literatura considerando a expressão do consequente. Mandani emprega regras nas quais o consequente é outra variável Fuzzy, enquanto Sugeno usa regras cuja conclusão é uma função polinomial das entradas.

Outro tipo de regras apresenta o consequente como uma função dos parâmetros da entrada. As três regras seguintes mostram, respectivamente, as expressões genéricas dos três tipos comentados ao longo do texto.

IF  $X_1$  é  $A_1$  e ... e  $X_n$  é  $A_n$  THEN  $Y$  é  $B$

IF  $X_1$  é  $A_1$  e ... e  $X_n$  é  $A_n$  THEN  $Y = p_0 + p_1X_1 + \dots + p_nX_n$

IF  $X_1$  é  $A_1$  e ... e  $X_n$  é  $A_n$  THEN  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$

onde  $X_i$  e  $Y$  são variáveis linguísticas, e  $A_i$  e  $B$  são conjuntos Fuzzy especificando o significado das variáveis linguísticas. Há quatro modos de se obter regras de controle Fuzzy: experiência do especialista e conhecimento de engenharia de controle, modelagem das ações de controle do operador, baseado no modelo Fuzzy de um processo e baseado na aprendizagem e auto-organização (CORDÓN; HERRERA; VILLAR, 2001).

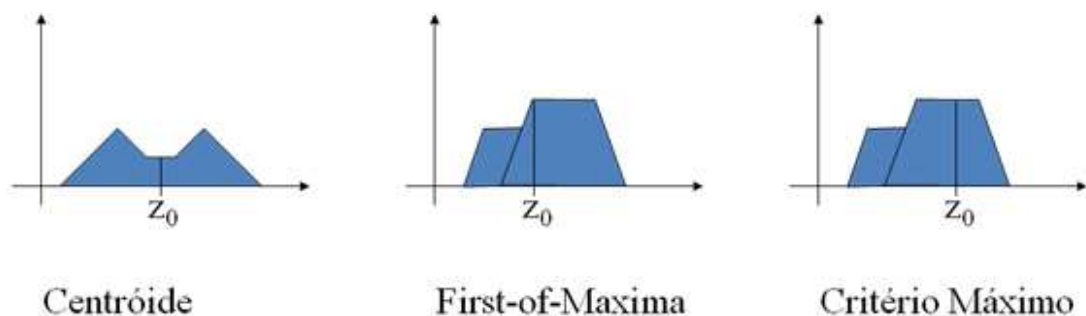
Em relação ao algoritmo da máquina de Inferência Fuzzy, esta é dividida em fases para obtenção do resultado da inferência em relação ao conjunto de fatos. O conjunto de evidências é dividido da seguinte maneira: fatos com premissas (antecedentes), grau de compatibilidade de cada regra, crença em cada regra, agregação. A agregação de quatro métodos pode ser destacada, como os mais utilizados: método clássico de Mamdani, Larsen, Tsukamoto e método clássico de Takagi-Sugeno (KARTALOPOULOS, 1996).

### 3.1.6 Método de Defuzzyficação

O método de Defuzzyficação converte as atuações de controle Fuzzy inferidas em ações de controle não-Fuzzy e efetua um escalamento, com o objetivo de compatibilizar os valores normalizados oriundos da fase predecessor de acordo com os valores das variáveis de engenharia de processo. Posterior ao método de inferência (motor inferência de controle Fuzzy) faz necessária a discretização de uma ação de controle não Fuzzy aderente à decisão e/ou resultado Fuzzy, de maneira a ser executada pelo sistema de controle.

Cabe ponderar que não existe procedimento sistemático para a escolha da estratégia de Defuzzyficação, as mais conhecidas são: o critério do máximo (MAX), que escolhe o ponto onde a função inferida tem seu máximo, a média dos máximos (MDM), a qual representa o valor médio dentre os demais pontos de máximo em caso de existir mais de um máximo, e o método do centro de área (CDA), ou seja, redefine e/ou retorna o centro de área da função inferida (GOMIDE; GUDWIN; TANSCHKEIT; 2010). Os critérios citados são técnicas de Defuzzyficação também conhecidos como: Centróide, *First-of-Maxima*, *Middle-of-Maxima* e Critério Máximo. Na figura 3-4 são mostrados através de formas geométricas os critérios mais utilizados no processo de Defuzzyficação.

Figura 3-4 – Os principais tipos de técnicas de Defuzzyficação: Centróide, First-of-Maxima, Middle-of-Maxima e Critério Máximo.



Fonte: Cox, (1994).

### 3.1.7 Modelo Básico Controlador Fuzzy

Uma das diferenças entre um sistema de controle “Fuzzy” (e um sistema de controle convencional é que no primeiro existe o elemento Fuzzyficação ou codificador que converte as entradas em suas respectivas representações difusas.

No controlador, os subconjuntos “Fuzzy” caracterizados por seus respectivos valores linguísticos, os quais são submetidos ao conjunto de regras que ativa o codificador (COX, 1994).

O codificador converte a saída difusa inferida, que é também composta por subconjuntos Fuzzy, em um valor numérico e preciso (ação de controle) Defuzzyficação.

A figura 3-5 apresenta uma estrutura básica de um controlador Fuzzy, observa-se nesta configuração a estrutura de blocos com as respectivas etapas: Fuzzyficação, Motor de Inferência, Base de Conhecimento Fuzzy (GOMIDE; GUDWIN; TANSCHKEIT; 2010).

Figura 3-5 – Estrutura básica do controlador Fuzzy

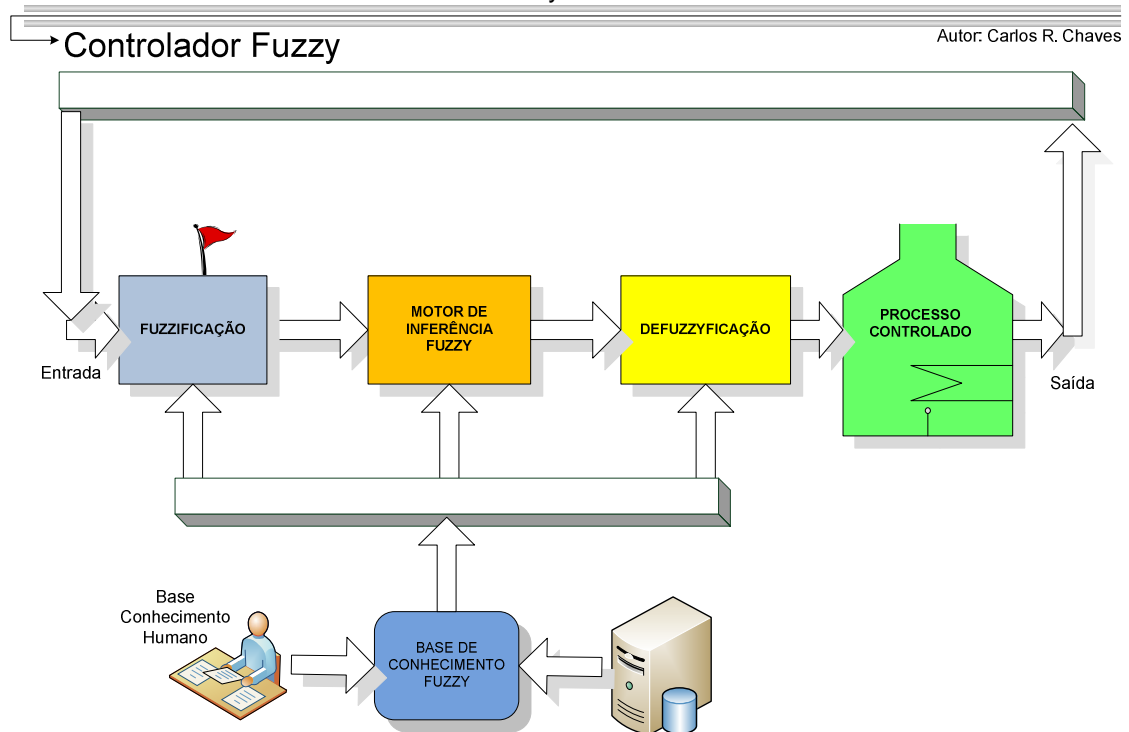


Figura 3-3.

Fonte: O autor.

Por fim, os algoritmos nebulosos e/ou linguagem Fuzzy oferece algumas vantagens tais como: uso de variáveis linguísticas mais próximas do pensamento

humano; requer poucas regras, valores e decisões; simplifica a solução de problemas e a aquisição da base do conhecimento; mais variáveis observáveis podem ser valoradas; facilidade de entendimento, fácil manutenibilidade; robustos; operam com falta de regras ou com regras defeituosas; acumulam evidências contra e a favor; proporciona uma rápida prototipagem.

As desvantagens da linguagem Fuzzy de maneira resumida são: requer um volume maior de simulações e testes; apresenta uma dificuldade maior para o aprendizado, dificuldade de estabelecer regras corretamente; a definição matemática não é precisa (WAN, 1998). Os controladores Fuzzy de maneira geral operam com variáveis de entrada física as quais representam o erro absoluto, gerado a partir da diferença entre o sinal de referência e a saída do processo (variação do erro). A variável de saída do controlador é aplicada ao sistema de controle. Cabe frisar que a opção por uma saída incremental, ao invés de absoluta, é mais condizente com o raciocínio empregado por operadores humanos, ou seja, proporciona uma redução e/ou otimização do universo da saída (HIROTA, 1995).

### **3.1.8 Sintonia de Parâmetros de Controladores PID Fuzzy**

Na fase de projeto de controladores Fuzzy, é considerada como procedimento executivo, a definição de alguns parâmetros relacionados com a constante de proporcionalidade, termo derivativo, integral, função objetiva, etc. Tais parâmetros podem ser definidos em decorrência da simulação e/ou experiência do projetista em implementação de soluções utilizando lógica nebulosa. Para processos não linear com características complexas, dinâmicas de alta ordem, torna-se imperativo a sintonia e configuração dos parâmetros relativos à estrutura da base de dados (COELHO, L. S.; COELHO, A. A. R., 1999). Esta <sup>25</sup>sintonia deve ocorrer em intervalos de tempo pré-determinado de maneira automática, com o objetivo de garantir a estabilidade e controlabilidade dentro das condições pré-estabelecidas. Estes parâmetros são conhecidos como parâmetros estruturais, ou seja, parâmetros fixos. Entretanto, existem parâmetros variáveis conhecidos como de parâmetros de sintonização: parâmetros estruturais relativos ao número de variáveis de saída e

---

<sup>25</sup>O termo sintonia de controlador PID denota a busca dos melhores parâmetros das constantes de proporcionalidade, com o objetivo de obter a melhor faixa de controle, isto é, menor variabilidade do controle (SANTOS, 2005).

número de variáveis de entrada, recursos de operação sobre os dados de entrada (somas, multiplicações, etc.), variáveis linguísticas. Segundo Coelho (1999, p.76 ) a obtenção de melhores controladores podem ser alcançadas mediante ao aprimoramento das metodologias de inteligência computacional visando o projeto de controladores multivariáveis que levem em consideração a interação entre as diferentes malhas de controle.

### 3.1.9 Controle Regulatório PID Fuzzy

Kocaarslan (2005) desenvolveu o controlador Fuzzy PI para aplicação em malhas de controle de caldeira. Segundo Kocaarslan (2005, o comportamento dinâmico de instalações industriais esta diretamente relacionada com as perturbações de carga e principalmente mudança da função de transferência.

A aplicação do controlador Fuzzy PI é justificada em função do comportamento multivariável e não linear e principalmente pela necessidade de sintonia dos parâmetros PI do controlador para a nova condição de processo.

O controlador Fuzzy proposto no artigo de Kocaarslan (2005) consiste em uma programação de ganho proporcional difusa integral (FGPI). O controlador regulatório altera as saídas em função da <sup>26</sup>entalpia do processo (não-linear e variante no tempo). Esta técnica é utilizado para ajustar os ganhos do controlador PI de acordo com perturbações nas saídas do sistema.

A solução atende a demanda de controle de vazão de combustíveis, controle de temperatura do vapor em um processo de controle térmico de uma usina termoeletrica.

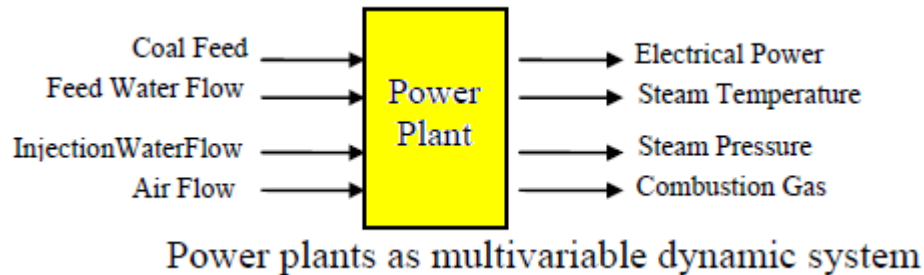
Para o desenvolvimento deste algoritmo, Kocaarslan (2005) identificou inicialmente as variáveis de saída do processo e entrada que afetam diretamente no desempenho da planta, para posterior desenvolvimento das regras e algoritmo do controlador Fuzzy. Nas figuras 3-6 e 3-7 é disponibilizado o diagrama de blocos com

---

<sup>26</sup>A quantidade e/ou conteúdo de calor de um sistema não pode ser medido, porem a variação de calor sofrida em uma reação química pode ser medida pela calorimetria. Quando o processo esta em uma condição de pressão constante recebe o nome de "variação de entalpia". Por definição se o calor trocado entre o sistema e o meio ambiente é medido a pressão constante, este é denominado Entalpia ou conteúdo calorífico o qual é simbolizado por H. Sendo que Entalpia (H) é o calor trocado a pressão constante (MORTIMER; AMARAL; 1998).

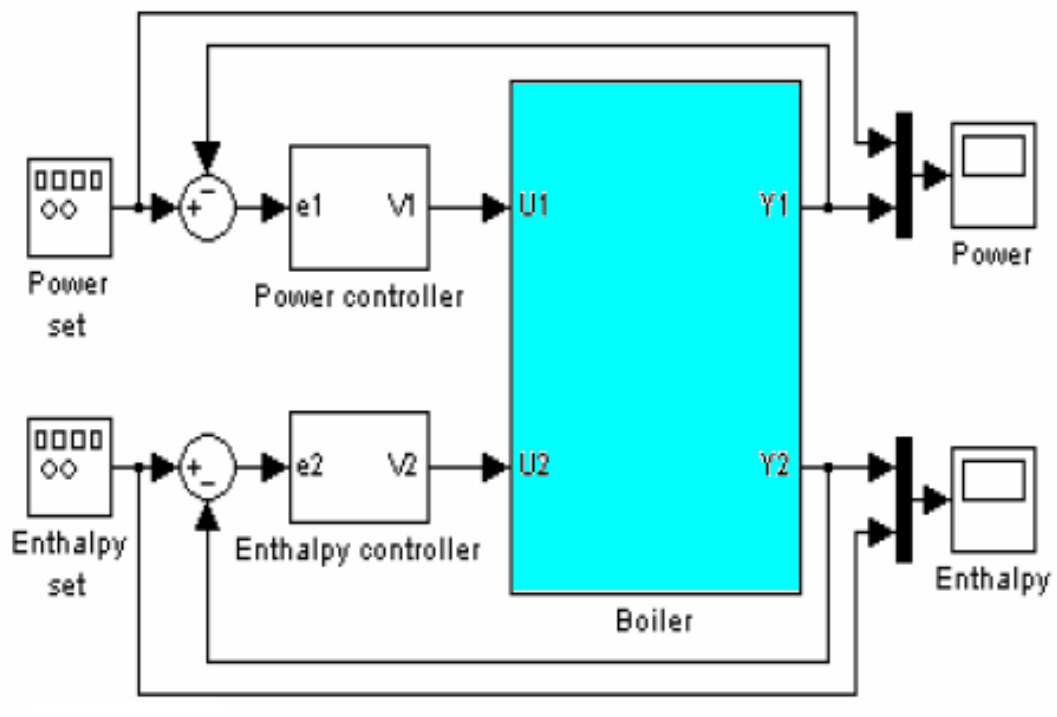
as variáveis de processo de geração de vapor da usina térmica, diagrama de blocos de simulação do processo de controle de energia térmica, simulado no Simulink.

Figura 3-6 – Diagrama de Blocos, representação das variáveis do processo de geração de energia térmica.



Fonte: Kocaarslan et al., (2005).

Figura 3-7 – Diagrama de blocos da planta com as respectivas variáveis de saída de entrada do processo de geração de energia térmica



Fonte: Kocaarslan et al., (2005).

O controlador Fuzzy foi desenvolvido para ser executado em um controlador lógico programável, com aproveitamento da infraestrutura de hardware existente na unidade. Kocaarslan (2005) justifica a adoção desta solução para a construção do controlador PI Fuzzy (FLC), devido à disponibilidade de capacidade computacional e biblioteca de elementos de lógica Fuzzy no equipamento (PLC), diminuindo

significativamente a demanda de recursos de software, hardware e investimentos adicionais.

Os resultados apresentados em relação à simulação utilizando controlador lógico com ganho difuso (FPGPI) mostram um desempenho satisfatório em relação ao controlador PID convencional aplicado em processo multivariável para a melhoria da eficiência energética em sistemas de produção de energia térmica.

No artigo de Maitelli (2005) é apresentada uma solução de controle de nível de um sistema de segunda ordem utilizando método Fuzzy. O objetivo principal era o desenvolvimento do algoritmo de controle nível PID com sintonia dos parâmetros utilizando método Fuzzy. O projeto consistiu-se na construção e sintonia de controladores PID utilizados no processo regulatório de nível de líquido (tanques acoplados). O ambiente de simulação da planta foi configurado no LABVIEW e os controladores PID Fuzzy foram implementados no controlador lógico programável (CLP), conectado a um sistema supervisório. A partir da configuração dos respectivos controladores (PID1 e PID2) aplicou-se o método Fuzzy para o controle da planta não linearizada descrita pelo modelo matemático, destacado na expressão 3-10 e 3-11:

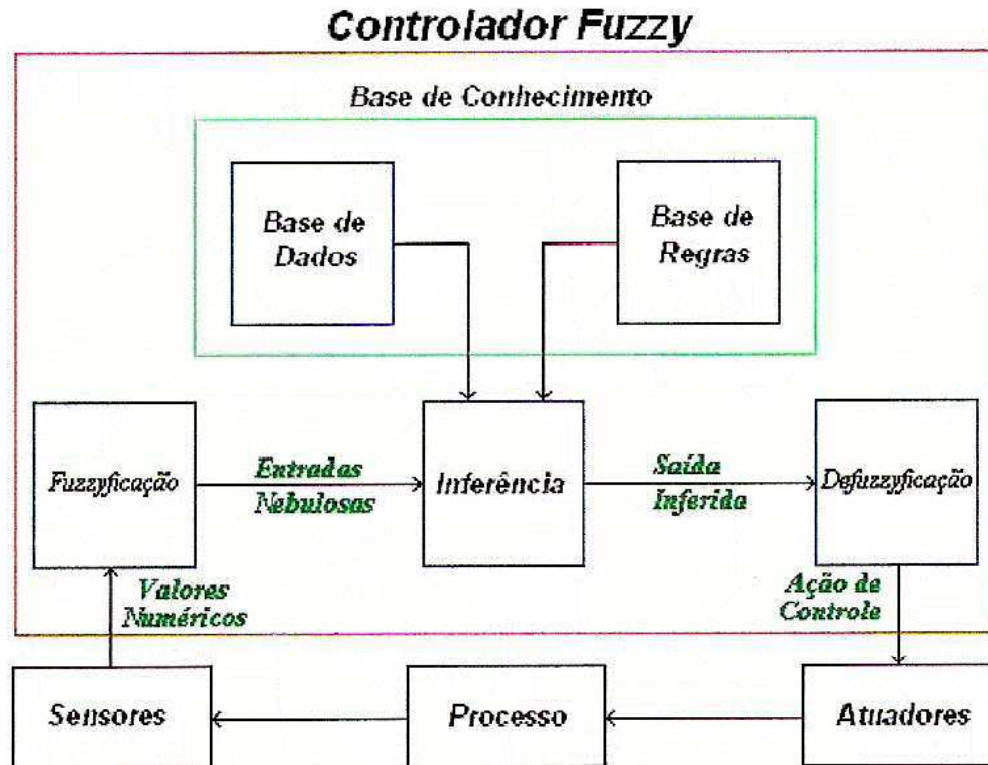
$$\dot{L}_1 = -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{2gL_1} + \frac{K_m}{A_1} V_p \quad (3-10)$$

$$\dot{L}_2 = -\frac{a_2}{A_2} \sqrt{2gL_2} + \frac{a_1}{A_2} \sqrt{2gL_1} \quad (3-11)$$

Segundo Maitelli (2005) a utilização de regras nebulosas (regras Fuzzy e variáveis lingüísticas) confere ao sistema de controle algumas vantagens, incluindo: simplificação do modelo do processo, melhor tratamento das imprecisões inerentes aos sensores utilizados, facilidade na especificação das regras de controle, linguagem próxima à natural, satisfação de múltiplos objetivos de controle e facilidade de incorporação do conhecimento de especialistas humanos. No artigo de Maitelli (2005) é apontada como ponto de atenção a definição da estrutura de Fuzzyficação das variáveis de processo, ou seja, conversão das informações

transmitidas (sinais) de sensores e atuadores. Na figura 3-8 é mostrado em diagrama de blocos o controlador Fuzzy PID, projetado por Maitelli (2005).

Figura 3-8 – Controlador Fuzzy, desenvolvido para controle de nível, sistema de segunda ordem.



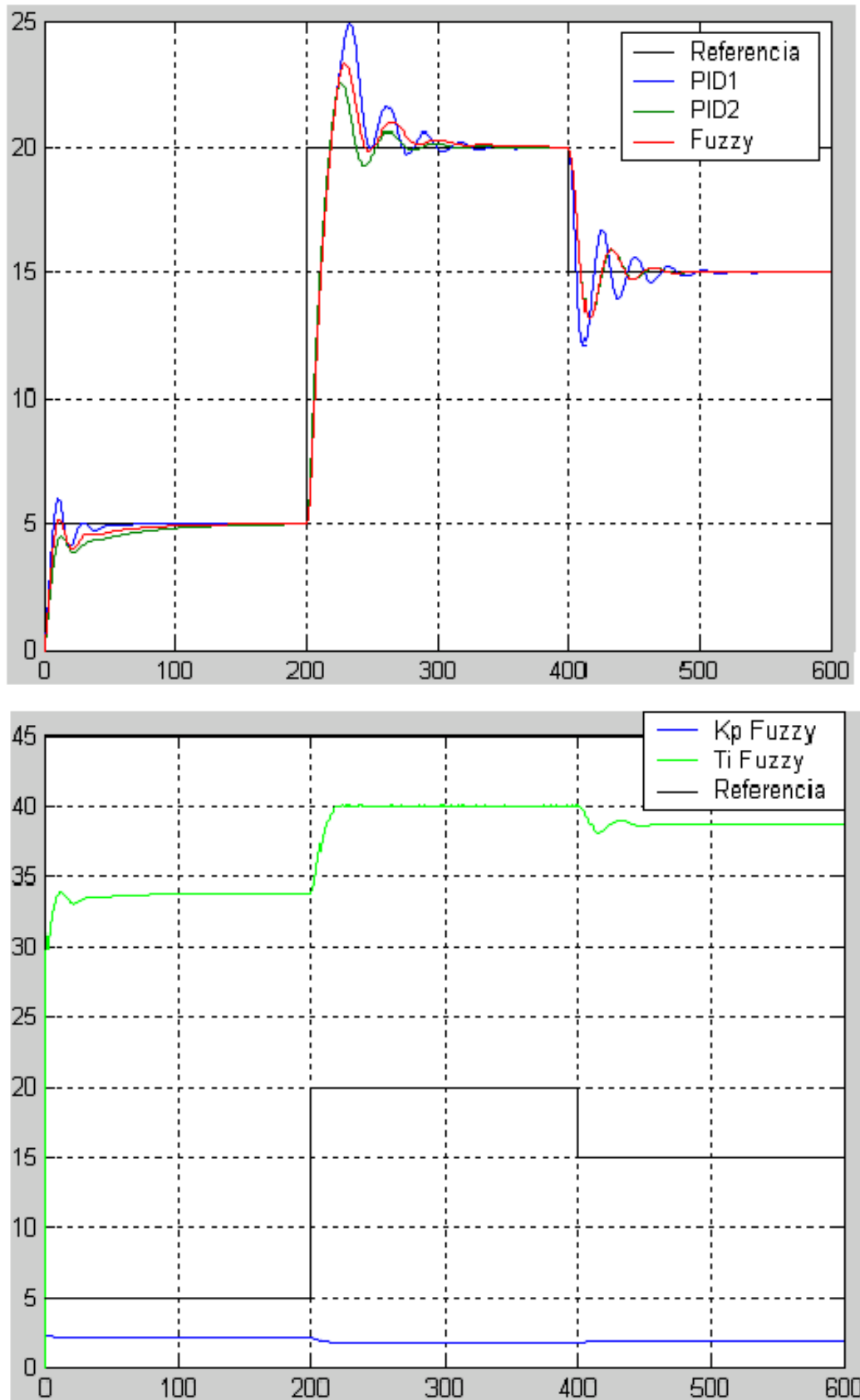
Fonte: Maitelli, (2005).

Na sequência são apresentados os resultados obtidos na simulação através da ferramenta computacional. Verifica-se através da figura 3-9 que o PID1 mostrou-se com um desempenho satisfatório em relação ao tempo de estabilização, por outro lado observa-se um maior <sup>27</sup>overshoot em relação ao controlador Fuzzy. O controlador Fuzzy apresentou um desempenho satisfaz os requisitos do controle regulatório em relação aos PID1 e PID2, com menor tempo de estabilização e overshoot (regime transitório para regime permanente).

<sup>27</sup>Sobre-elevação e/ou “overshoot” é o valor máximo atingido pela grandeza física da planta em relação ao valor esperado. É medido em percentagem da entrada ajustada. Ocorre na fase de transitório (OGATA, 1998).



Figura 3-9 – Resposta da Planta em malha fechada a mudança de referência Utilizando o PID1, PID2 com Método Fuzzy



Fonte: Maitelli, (2005).

Olbring (1998) desenvolveu um controle com método Fuzzy com o objetivo de melhorar a eficiência de energética de um forno cerâmico. Neste artigo Olbring (1998) ressalta o fator motivacional para a utilização do controle Fuzzy em controle de fornos cerâmicos. Os principais aspectos são relacionados com emissão de poluentes para o meio ambiente e rentabilidade financeira do processo produtivo.

Segundo Olbring (1998) a lógica Fuzzy fornece, por meio da avaliação do comportamento térmico do sistema de aquecimento, uma base de regras poderosa para a tomada de decisões, a fim de garantir o funcionamento ideal do sistema de térmico. O sistema de controle desenvolvido por Olbring (1998) é constituído por três diferentes controladores Fuzzy com as seguintes funções: controlador difuso PID para o processo regulatório de aquecimento da água para produção de vapor, controlador Fuzzy para avaliação ótima de demanda de potência calorífica e controlador Fuzzy para o segundo estágio térmico do forno chamado de sistema cascata.

O controle tem como função objetiva a <sup>28</sup>maximização do ganho financeiro e atendimento da legislação ambiental sendo esta uma métrica de maior grau de importância em relação às restrições operativas (OLBRING, 1998). Segundo Olbring “a redução do consumo de combustível significa simultaneamente redução de custo e diminuição significativa da poluição ambiental”.

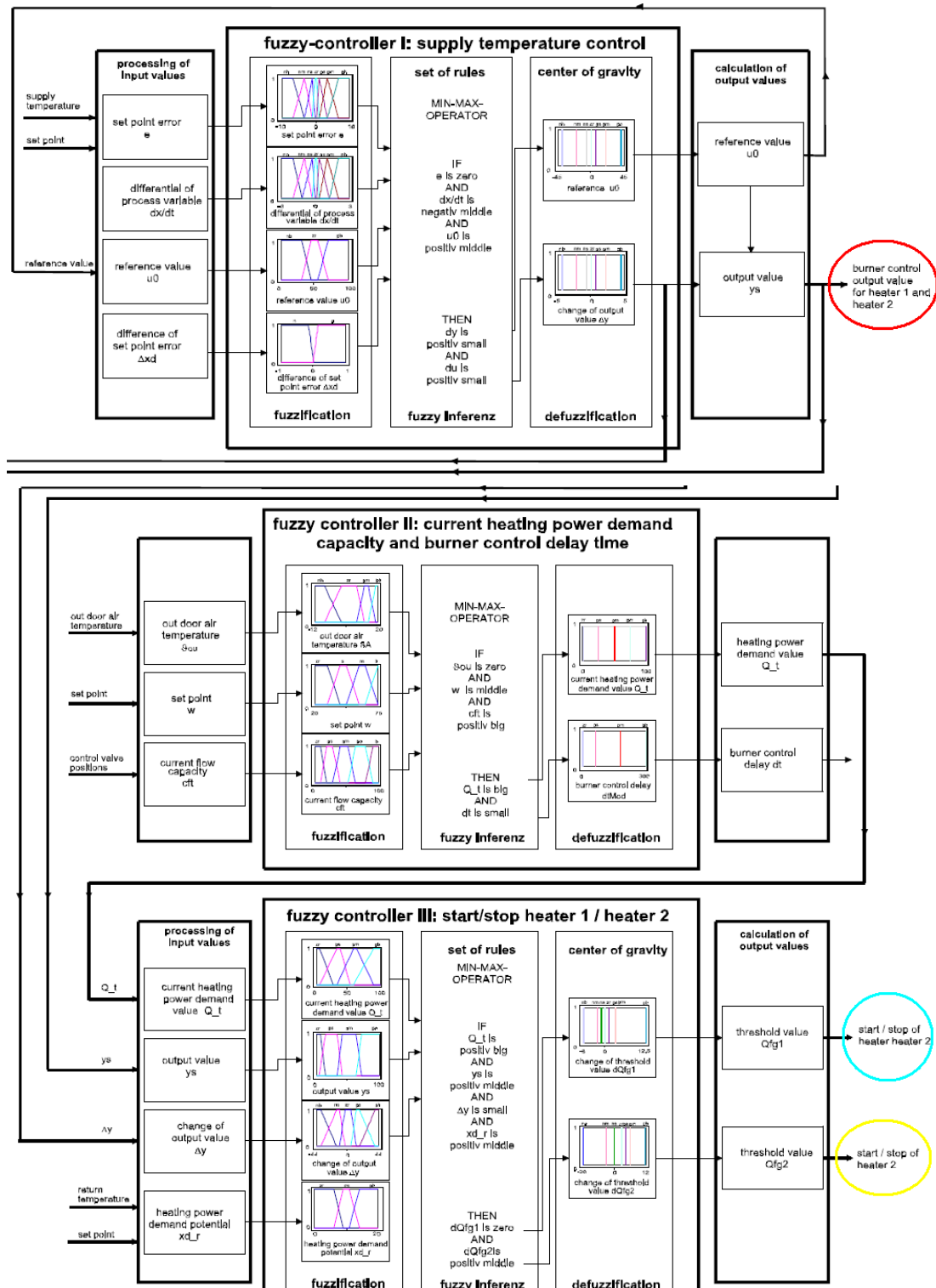
Na figura 3-10 é mostrado a proposta de sistema de controle Fuzzy para otimização de mecanismo de geração de energia térmica e requisitos relativos ao meio ambiente. Observa-se no diagrama de blocos do sistema de controle proposta que o controlador Fuzzy I (Fuzzy-Control Block-I) é responsável por manter um valor de temperatura na entrada do primeiro conjunto de queimadores, (variações da temperatura de entrada comprometem o material, produto do processo de produção de revestimento cerâmico). O controlador Fuzzy II e III (Fuzzy-Control Block-II e III) calculam a capacidade de demanda de energia térmica para o segundo estágio do forno.

É parte integrante das estratégias de controle regulatório do sistema Fuzzy I, II e III a manutenção da vazão de ar e de combustível, dentro dos limites estabelecidos para a manutenção da eficiência térmica e ambiental.

---

<sup>28</sup> O conceito de maximização, de acordo com o dicionário Aurélio, é determinação do maior valor que uma grandeza poderá atingir. Na linguagem mercantil denotam-se lucros: ganho líquido, ganho de capital (FERREIRA, 2004).

Figura 3-10 – Diagrama de blocos do sistema de controle Fuzzy de demanda termica para fornos cerâmico

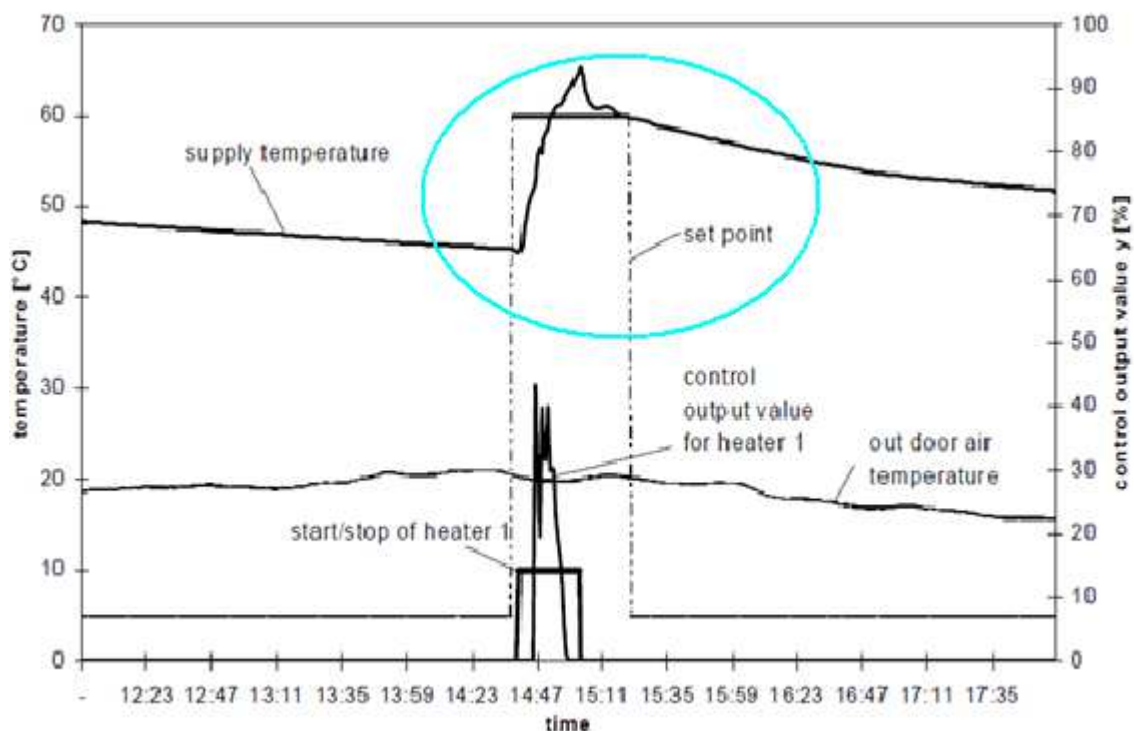


Fonte: Olbrig, (1998).

O sistema de controle Fuzzy de Olbring (1998) representa uma solução de software para controle da eficiência energética de fornos cerâmicos, em decorrência das particularidades construtivas destes equipamentos, podendo ser adaptados para

processos da indústria petroquímica e química. Os resultados obtidos com a implementação desta metodologia de controle utilizando lógica Fuzzy pode ser evidenciado através do gráfico da figura 3-11. Segundo Olbring (1998) o tempo de resposta do controlador Fuzzy para as demandas do sistema de aquecimento mostrou-se eficiente em relação as variações de set-point e distúrbios do processo (cor azul). O tempo de resposta do sistema atende as especificações e características construtivas dos fornos cerâmicos,<sup>29</sup> inércia térmica, restrição quanto máxima variação térmica, (OLBRING, 1998).

Figura 3-11 – Resposta do processo térmico em relação as variações de carga e set-point



Fonte: Olbring, (1998).

Malhotra e Sodhi (2011) desenvolveram controlador Fuzzy PID aplicado em uma malha de controle regulatório de vazão de água de caldeira água-tubular. O controlador Fuzzy PID foi configurado em um CLP (Controlador Lógico Programável). A motivação deste projeto era desenvolver uma estratégia de controle com foco na melhoria do controle de geração de energia térmica (eficiência energética),

<sup>29</sup> Inércia térmica é um termo comumente utilizado para referenciar a transferências de calor e sua capacidade térmica volumétrica (ou capacidade calorífica volumétrica). A inércia térmica é modelada como uma função da densidade, calor específico e capacidade térmica de um material. Inércia Térmica é considerada uma propriedade importante a qual deverá ser considerada no processo de controle das variações de temperatura (LORA, 2004).

estabilidade no controle da produção de vapor, e diminuição da frequência de paradas de emergência da caldeira.

A malha de controle de vazão de água para caldeira, opera em modo cascata, ou seja o set-point remoto é proveniente de um controle de vazão e pressão de vapor. Quando ocorrem distúrbios que afetam a pressão de vapor (aumento da vazão de vapor seja no sentido ascendente e/ou descendente) o controlador de pressão de vapor altera comanda o set-point do controlador de vazão de água e combustíveis. A estratégia de controle nesta caso é antecipatória, isto é, uma maneira de garantir a manutenção do nível de água no tubulão superior da caldeira e consequentemente a produção de vapor e segurança do processo. Neste estudo de caso os autores utilizaram a estrutura de hardware de um controlador lógico programável (CLP) em função das disponibilidade da biblioteca de blocos Fuzzy. É oportuno enfatizar que o CLP utilizado neste estudo de caso (plataforma de hardware e software) é responsável pelo sistema de sequenciamento de partida, parada de emergência e controle regulatório das malhas de vazão de vapor, nível de água, vazão de combustíveis e pressão da fornalha. Segundo Bega et al (2003), o aproveitamento da estrutura de hardware de CLP para introdução de controle regulatório pode incorrer em diminuição da disponibilidade e confiabilidade operativa da caldeira, não sendo considerada uma boa pratica pela grande maioria dos estudiosos na área de controle e automação.

Segundo Malhotra e Sodhi (2011), a metodologia adotada para a construção do controlador Fuzzy PID foi o processo de identificação da função de transferência do processo (vazão de água). A estratégia utilizado para a identificação do modelo matemático (função de transferência) foi através do método Ziegler & Nichols, resposta ao degrau em malha aberta. Posterior ao processo de identificação, iniciou-se as entrevistas com a equipe de operação para identificar as variáveis linguísticas do modo de Fuzzyficação, estabelecimento de regras do motor de inferência e método de Defuzzificação. De acordo com os resultados apresentados no estudo de caso, o sistema de controle de vazão de água (Fuzzy PID), apresentou um comportamento satisfatório em comparação com o controlador PID classico.

É destacado no artigo de Malhotra e Sodhi (2011), que o controlador Fuzzy PID é capaz de responder em faixas de operação de baixa e alta demanda de vapor, onde o controlador PID clássico não atende as expectativas de operação com variação do range de produção.

Considera-se também como ponto de destaque no estudo de caso de Malhotra e Sodhi (2011) desempenho do controlador Fuzzy PID em manter o processo dentro dos limites variabilidade de acordo com as regras da base de conhecimento. O controlador mostra-se apropriado para processo não lineares, ou seja, onde a faixa de operação apresenta um ganho variável (controlador ganho adaptativo).

Galzina, Majdandzic e Šarić (2008), propõe em seu trabalho a utilização de controlador Fuzzy para melhoria da eficiência energética do sistema de produção de vapor. Galzina e Majdandzic (2008) aplicaram método Fuzzy para resolver problemas relacionados com o controle regulatório de um sistema ajuste de nível de água para o tubulão superior (Boiler) e qualidade de combustão.

As regras de controle Fuzzy foram extraídas a partir do conhecimento do operador com base nos critérios de relevância relativos e dominantes para os já existentes. Modelo de controle difuso proposto foi ajustado para determinado problema com a simplificação das variáveis de saída para acelerar o cálculo final e Defuzzyficação.

No trabalho proposto por Galzina, Majdandzic e Šarić (2008), dois sub-sistemas de controle da caldeira foram analisados, nível do tambor superior (tubulão) e qualidade da combustão. A característica do processo não-linear o controlador Fuzzy PID com modelos dinâmicos apresentou melhor resultado em relação ao PID clássico. Segundo Galzina, Majdandzic e Šarić (2008), os erros devidos à variação da carga e diferentes regimes de trabalho foram eliminados ou reduzidos pelo uso do modelo Fuzzy para o modelo de controle de nível, porém para o sistema de controle da eficiência da combustão o modelo de controle não produziu resultados satisfatórios, portanto deve ser melhor elaborado e/ou revisto em relação a modelagem. Uma dificuldade apontada no trabalho desenvolvido por Galzina, Majdandzic e Šarić (2008) foi em relação entrevista com a equipe de produção e o entendimento do melhor ponto de operação para determinação dos valores linguísticos, ou seja, determinação do conjunto de regras para base de conhecimento e motor de inferência.

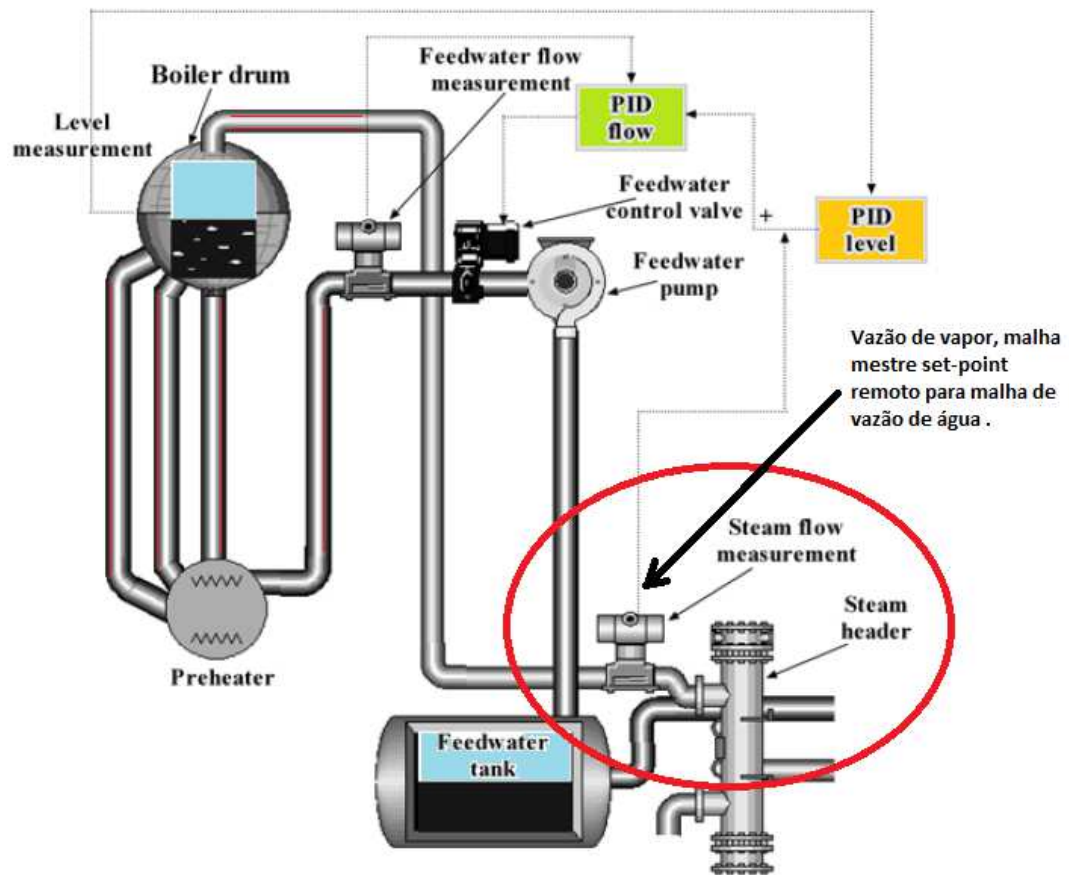
O controlador Fuzzy PID pode ser considerado como uma atrativa opção para a solução de sistemas regulatório, porém o sucesso do projeto está diretamente relacionado com o conhecimento do projetista em relação ao processo onde será aplicado. Uma desvantagem segundo os autores, é que o controlador Fuzzy PID

nãopode ser usado emqualquer outro sistema semelhante em função das peculiaridades relativas a função de transferência. Este fato destacado por Galzina, Majdandzic e Šarić (2008) estabelece uma perspectiva investigativa sobre o estudo mais aprofundado sobre a generalização do controlador Fuzzy PID.

Uma direção possível é o utilização das redes neurais ealgoritmo genético, para o ajuste do controlador Fuzzy PID com regras de formação do suposto modelo Neural-Fuzzy genético algoritmo. O algoritmo poderá ser utilizado para selecionar as regras em condições diferentes de operação da planta (partida, operação e parada de produção. Galzina, Majdandzic e Šarić (2008) propõe o aumento do uso do conhecimento humano para estabelecimento das funções de pertinência e parâmetros relacionados a base de conhecimento de um sistema Fuzzy PID.

É pertinente destacar que a motivação apontada no trabalho proposto pelos autores é em relação ao numero consecutivas de paradas da caldeira, aproximadamente 30% do tempo operação, configura um numero representativo sobre os aspectos de continuidade operacional, degração do equipamento, confiabilidade. A quantidade de parada de operação da caldeira em regime de emergência esta diretamente relacionada com falha no controle de nível e sistema de proteção de chama. O controle de combustão com baixa eficiência é apontado como um dos *bad-actors* (vilões) do baixo desempenho do controle de temperatura da fornalha e elevação dos índices de emissão. A figura 3-12 é mostrado o fluxograma de processo com a configuração de controle de uma malha de vazão de água do tubulão superior de uma caldeira, onde foi objeto de estudo de caso. A malha de vazão de vapor esta interconectada a controlador de vazão de água, a estratégia de controle é tipicamente mestre-escravo (controle cascata), isto é, o controlador de nível é comandado pelo controlador de vazão de vapor (GALZINA; MAJDANDZIC; ŠARIĆ, 2008).

Figura 3-12 – Fluxograma de processo de uma Caldeira (Água-tubular), com as respectivas malhas de controle de vazão de vapor e água de alimentação do tubulão superior



Fonte: Galzina, Majdandzic e Šarić, (2008).

Neste trabalho fica explícito a necessidade de uma avaliação depurativa sobre as condições operativas dos elementos iniciadores da lógica de proteção e controle do processo de geração de vapor (Caldeira).

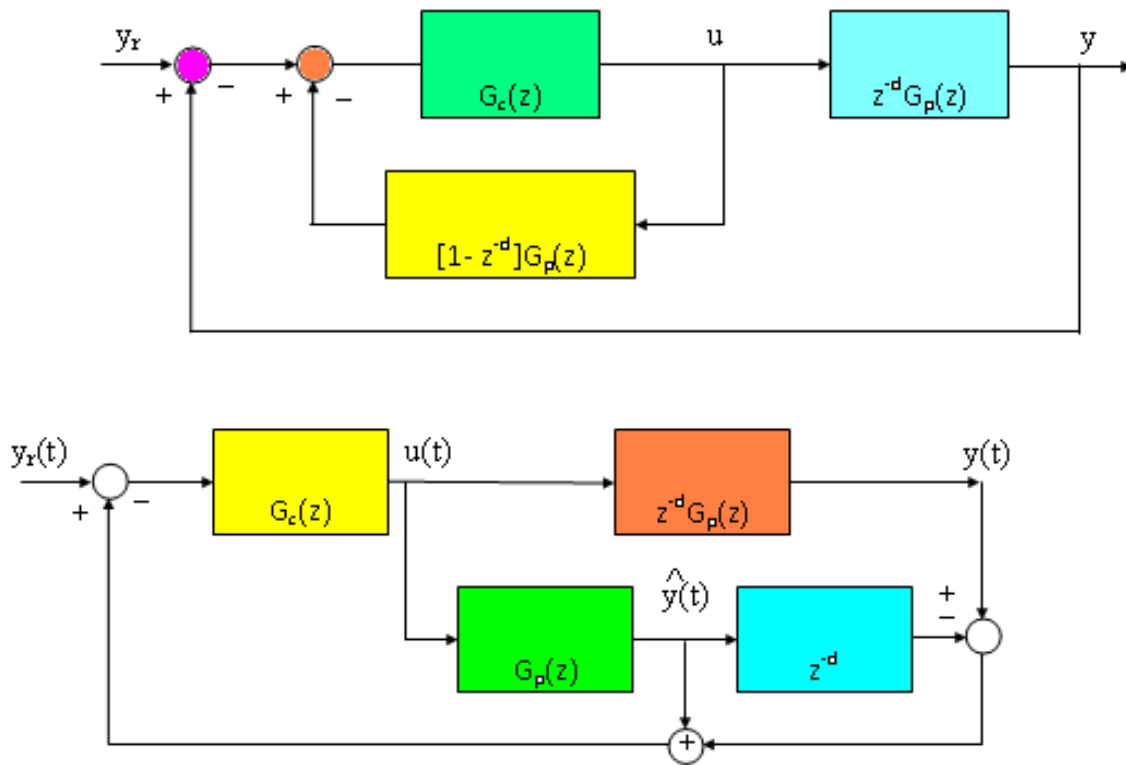
Liu e Yuan (2012) apresentam em seu artigo uma proposta para desenvolvimento de sistema de controle de alimentação de água para caldeira com base em lógica difusa com preditor de Smith. A proposta consiste em diminuir a incerteza dos parâmetros do modelo e tempo de atraso da variável controlada (alimentação sistema de água de caldeira), combinado com uma melhor eficiência do método do preditor Smith com controle PID. O diferencial do projeto proposto pelos pesquisadores Galzina e Majdandzic e Šarić (2008), está na modificação da estrutura do preditor de Smith de modo a garantir uma sensibilidade aos sinais de alta e baixa frequência, antecipando sobre maneira efeitos de atraso de transporte. O Preditor de Smith, consiste em uma técnica consagrada criada por Smith em 1957.

A estrutura do preditor de Smith produz uma compensação de projeto baseada em modelo que divide o modelo da planta em duas parcelas: a dinâmica do



modelo e o atraso. Na figura 3-13 mostra um diagrama de blocos do preditor de Smith em um sistema de controle de processo.

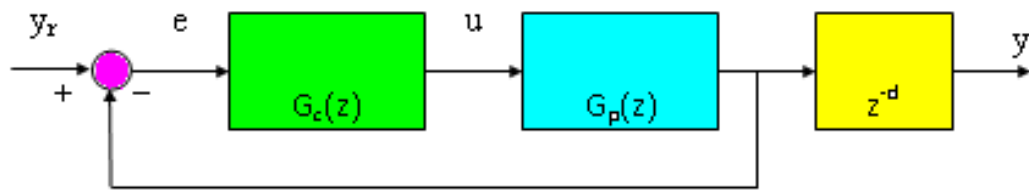
Figura 3-13 – Preditor de Smith para sistema de controle discreto



Fonte: O autor.

O controlador atua no processo como se não existisse o atraso na dinâmica de malha. O atraso de transporte e/ou massa está associado ao sinal de referência. A figura 3-14 ilustra com um diagrama de blocos do sistema de controle com a respectiva equação de síntese (3-12) do preditor de Smith, a qual explicita a compensação do atraso de transporte. Torna-se importante destacar que o controlador atua no processo como se não existisse o atraso na dinâmica de malha, em decorrência da utilização do preditor de Smith.

Figura 3-14 – Diagrama de blocos do sistema de controle com a respectiva equação de síntese do preditor de Smith, diminuição do atraso de transporte.



$$\frac{Y}{Y_R}(z) = z^{-d} \frac{G_c(z)G_p(z)}{1 + G_c(z)G_p(z)} \quad 3-12$$

Fonte: O autor.

A ideia principal é elaborar um controlador Fuzzy imunológico, ou seja, uma melhora do preditor de Smith. O Controlador PID Fuzzy imunológico poderá efetuar auto-tune dos parâmetros relativos as constantes PID com capacidade de adaptação para a diversificação dos parâmetros do objeto de controle (malha de controle de vazão de água). A motivação para este projeto esta relacionado de inundação do tubulão superior da caldeira (aumento excessivo do nível de água), provocando uma queda da temperatura do vapor e diminuição da produção do mesmo. O atraso de transporte e massa e identificado pelos autores como causa para a variabilidade de instabilidade do controle de nível do tubulão superior da caldeira. Com O controlador projetado é aplicada à alimentação de sistema de controle de vazão de água no modo cascata, de água. Este sistema foi simulado no Matlab sobre diferentes condições de operação. Os resultados obtidos mostram que o sistema de controle projetado tem capacidade adaptativa para a diversificação do modelo e parâmetros relacionados com a dinâmica do processo. A estabilidade, precisão do controlador Fuzzy imunológico são superiores em relação aos sistema de controle convencional.

Liu e Yuan (2012) descrevem em seu artigo que a manutenção do nível de água de caldeira tambor superior (Tubulão) em uma determinada faixa é um importante indicador de manutenção das condições operativas e de segurança da caldeira. Outro ponto de destaque é mencionado no trabalho de Liu e Yuan (2012) em relação baixa eficiência de desempenho de controle do sistema de controle de vazão de combustíveis. A instabilidade do processo de controle de nível de agua na caldeira introduz uma variabilidade nas malhas de controle de combustíveis e

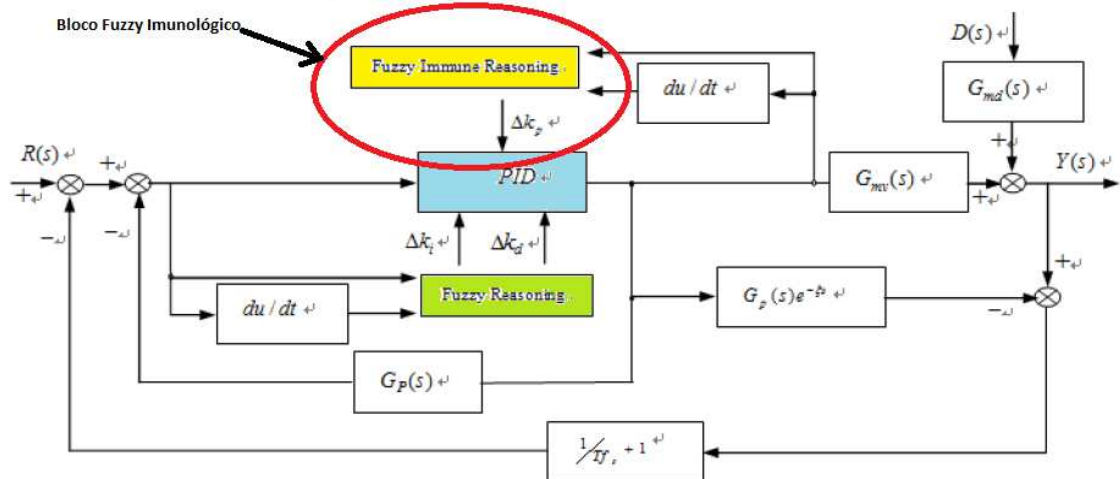
consequentemente um aumento no consumo dos insumos (vazão de óleo, gás combustível, etc.) e comprometimento da eficiência energética do sistema. Liu e Yuan (2012) destacam que o controle regulatório avançado constitui uma solução adequada para melhoria da eficiência energética e otimização do consumo de na geração de térmica, principalmente em equipamentos como fornos, caldeiras e turbinas.

A proposta da estratégia de controle com melhoria no preditor de Smith (diminuição do atraso de transporte) segundo os autores, forneceu ao controlador uma maior velocidade em relação ao controlador Fuzzy PID. Outro aspecto considerado no trabalho é em relação imunidade do controlador as perturbações de baixa frequência e sensibilidade para o mudança do modelo.

Segundo Liu e Yuan (2012), os resultados das simulações mostraram que as malhas relacionadas com o controle de nível de água da caldeira utilizando a nova estratégia obtiveram uma dinâmica satisfatória e facilidade em função da aderência do modelo e configuração da base de conhecimento do sistema de inferência (motor de inferência). O trabalho de Liu e Yuan (2012) teve como base a teoria de sistema imunológico humano, onde a resposta a um determinada patologia, representa uma liberação de células que irão combater os indivíduos invasores (bactérias e vírus), ou seja, o sistema imunológico biológico pode produzir anticorpos contra antígenos (invasores).

No caso do sistema de controle Fuzzy imunológico, o raciocínio imunológico é discretizado pelo algoritmo Fuzzy o qual tem uma estrutura que reconhece as características “patológicas do processo, no caso específico os distúrbios que o sistema de controle de nível da caldeira pode introduzir nas demais malhas de controle. Na figura 3-15 é mostrado o diagrama de blocos do controlador Fuzzy imunológico, objeto de estudo de Liu e Yuan (2008).

Figura 3-15 – Controlador Fuzzy imunológico, simulado no Matlab



Fonte: Liu e Yuan, (2008).

### 3.1.10 Estratégias de Controle Preditivo

A ideia do controle preditivo iniciou-se na década de 1960. No entanto o desenvolvimento efetivo de aplicações na área industrial surgiu somente na década de 1980, após a publicação dos primeiros artigos sobre controle preditivo. Cronologicamente Cutler e Ramaker (1980) propôs o controle MPHC (*Model Predictive Heuristic Control*) que ficou posteriormente conhecido como MAC (*Model Algorithmic Control*), enquanto que Cutler e Remaker (1980) apresentaram o DMC (*Dynamic Matrix Control*).

A estrutura de algoritmo MAC proposta por Richalet et al (1978) obtém o modelo do processo através do método de resposta ao impulso. Na proposta de Cutler e Remaker (1980) em relação ao método adotado pelo algoritmo para o processo de identificação do modelo matemático do processo, este utiliza o método de resposta ao degrau.

O controle preditivo baseado em modelo, também chamado de MPC (*MPC – Model Predictive Control*), é considerado como um dos mais utilizados em função do seu desempenho satisfatório em relação às estratégias de controle em processos industriais não lineares (GE; CHIU; WANG, 2001).

Muitos dos aspectos fundamentais num projeto de controle industrial prático podem ser explorados no controle preditivo baseado em modelo, como a trajetória de referência futura, predição de perturbações e a possibilidade de inclusão de restrições, verificando-se, assim, a flexibilidade desta técnica de controle (ZAMBRANO; CAMACHO, 2002).

O modelo do controle preditivo MPC inicialmente idealizado para aplicações em sistemas de potência e na indústria petroquímica, atualmente, controle preditivo é empregado nos diversos seguimentos das áreas do conhecimento humano como a medicina, sistema financeiro etc.

Com a massificação em relação à utilização das estratégias de controle preditivo aplicado em diversas áreas, estima-se que em um curto espaço de tempo, o controlador preditivo deve substituir a maioria dos controladores PID clássicos em função da sua ineficiência em relação à aplicação em processos não-linear (SANTOS, 2007). Em relação à estrutura básica do MPC esta é apresentada na figura 3-16. É possível identificar por meio da estrutura apresentada na figura os principais elementos envolvidos no controlador preditivo, tais como:

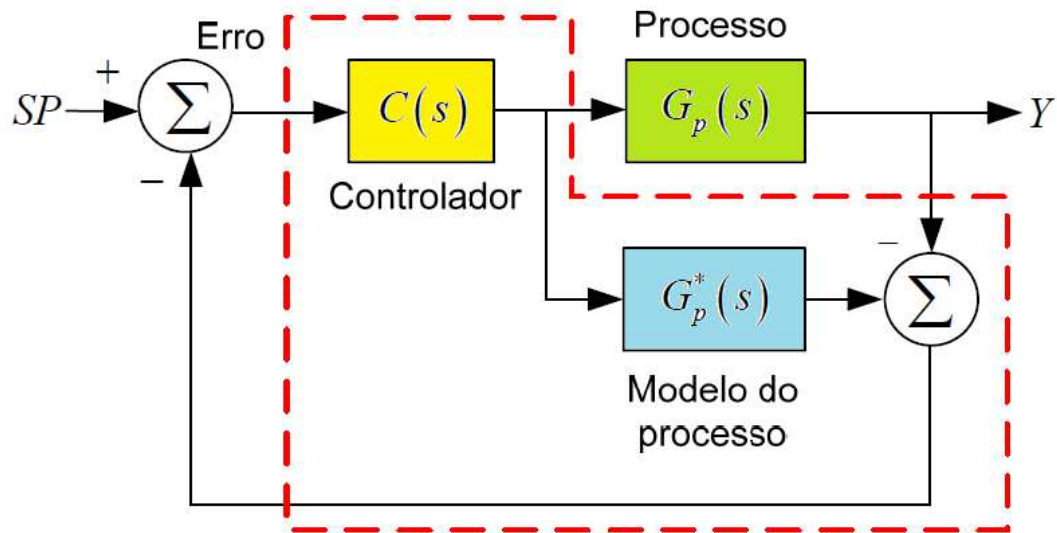
1-Trajetória de Referências - representa o comportamento do sinal desejado para a saída futura. É o conhecimento prévio desta trajetória que garante ao controlador uma característica antecipativa.

2- Modelo- deve ser capaz de representar o comportamento dinâmico de maneira precisa e aderente ao processo. De acordo com a necessidade, este modelo pode ser linear ou não linear e podendo, ainda, ser atualizado através de métodos de identificação *on-line* conferindo ao controlador uma característica adaptativa.

3- Preditor- fornece através do modelo matemático uma predição da saída futura com base na informação atual da planta.

4- Otimizador- minimiza a função custo a cada período de amostragem de maneira a obter uma ação de controle que garanta um desempenho adequado ao sistema. A função a ser minimizada pode contemplar além de parcelas associadas ao erro futuro e ao incremento no sinal de controle, podem ser inseridos termos que disponibilize para o controlador preditivo, propriedades que propiciem uma melhora no seu desempenho frente às particularidades do processo (GUIMARÃES, 2006).

Figura 3-16 – Estrutura funcional do Controlador MPC

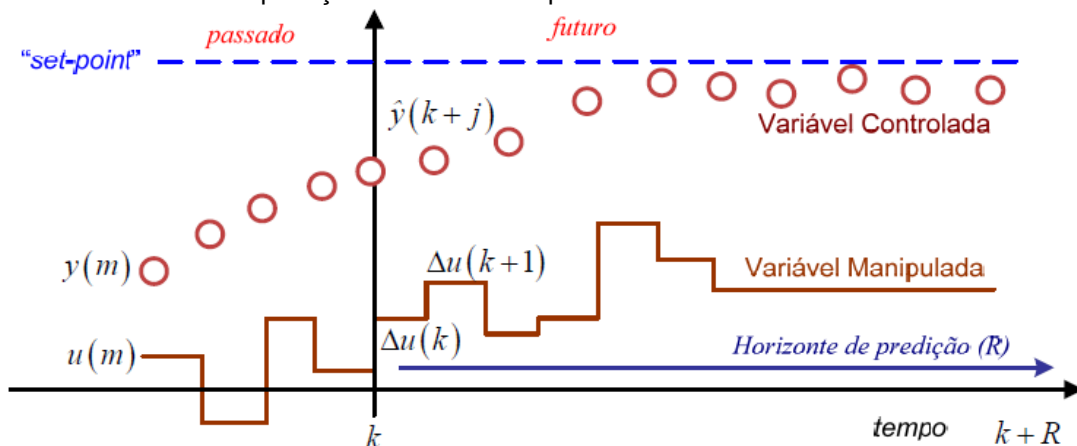


Fonte: Campos e Teixeira, (2007).

### 3.1.11 Controle Preditivo MPC

Como destacado no parágrafo anterior o *MPC* baseia-se na predição do comportamento futuro do processo para o cálculo do sinal de controle. As predições são feitas através da função de transferência do processo (modelo matemático do processo) sobre um intervalo de tempo denominado horizonte de predição cujo conceito é ilustrado na figura 3-17.

Figura 3-17 – Horizonte de predição do controlador preditivo



Fonte: Palú, (2001).

O horizonte de predição final ( $k+R$ ) representa o intervalo futuro onde está sendo considerado o comportamento da saída da planta. A partir do horizonte de predição é calculado o comportamento da saída em um intervalo de tempo, a partir

da função de transferência do processo. O horizonte de controle ( $y(k+j)$ ) corresponde ao número de ações de controle consideradas e, a partir das quais, a entrada do sistema é considerada constante. As ações de controle futuras são calculadas mediante a otimização de uma função objetivo de forma a levar a saída da planta ao encontro de uma trajetória de referência pré-estabelecida.

Na escolha da função objetivo podem-se adotar, ainda, outros critérios como o esforço de controle. Após a aplicação da ação de controle calculada para o instante atual ( $K(t)$ ), com base nas novas informações obtidas, o procedimento é repetido e, assim, sucessivamente, a cada instante de amostragem (ZAMBRANO e CAMACHO, 2002). O controle preditivo é dividido entre controladores baseados em modelos lineares e por matriz dinâmica. A principal característica do controlador preditivo baseado em modelos é devido a sua facilidade de empregar modelos lineares (simplificados), permite que todo o algoritmo de cálculo seja executado dentro do intervalo de tempo de uma amostragem, permitindo um controle em “tempo real. O modelo linear simplifica uma solução analítica para problemas relacionados com a minimização da função custo, quando não são consideradas restrições” (CAMACHO; BORDONS, 2004). É fato que nos últimos anos observou-se um crescimento expressivo nas aplicações industriais para soluções de controle de processos utilizando o controlador preditivo baseado em modelos lineares. A Tabela 3-2 apresenta um conjunto de aplicações do controlador preditivo nos respectivos seguimentos industriais (QIN; BADGWEL, 2000).

Tabela 3-2 – Aplicações Comerciais de MPC

Área	Adersa	Aspen Technology	Continental Controls	DOT Products	Pavilion Techno.	Total
Ar e gás			18			18
Química	02		15		05	22
Alimentos					09	09
Polímeros		01		05	15	21
Papel					01	01
Refinaria					13	13
Utilidades		05	02			07
Outras	01		01			02
Total	03	06	36	05	43	93

Fonte: Quin e Badgwell, 2000.

### 3.1.12 Controle Preditivo DMC

O controlador por matriz dinâmica DMC (Dynamic Matrix Control) desenvolvido por C. R. Cutler e B. L. Ramaker (1980) é considerado como um dos primeiros controladores preditivos baseados em modelo matemático do processo. O DMC quando aplicado em um sistema SISO (single input, single output) é configurado em modelo não paramétrico da resposta ao degrau e utiliza como função custo à equação 3.13.

$$J_{DMC} = \sum_{j=N_1}^{N_2} [\hat{y}(t+j) - y_r(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \Lambda \Delta u^2(t+j-1) \quad 3.13$$

onde se considera  $\Delta u(k+j) = 0$  para  $j \geq N_u$ ,  $y_r(t)$  é a referência,  $\Lambda$  é um fator de ponderação aplicado sobre o incremento no esforço de controle e  $\hat{y}(t+j)$  representa as predições da saída nos instantes de tempo  $(t+j)$ .

A otimização da equação 3.14 fornece  $N_u$  valores para o sinal de controle, mas somente  $\Delta u(t)$  é aplicado. No período de amostragem seguinte a solução é calculada novamente e outro conjunto de  $N_u$  valores de controle é obtido. As principais características do controlador preditivo *DMC* estão relacionadas como número de termos do modelo da resposta ao degrau ( $N$ ). O degrau aplicado deverá ser um valor suficientemente grande, tal que  $NT_s \geq t_s$ , onde  $t_s$  (*settling time*) é o tempo de estabilização do processo. Outra característica importante para o processo de obtenção do modelo pelo algoritmo do DMC é em relação ao processo, isto é deverá manter-se estável e na condição de malha aberta (CAMACHO; BORDONS, 2004). Em relação ao erro predição, o processo deverá ser modelado como uma perturbação do tipo degrau atuando na saída do processo, de maneira a garantir a obtenção da função transferência o mais próxima da realidade.

Em relação aos parâmetros de sintonia do *DMC*, estes permitem uma maior flexibilidade de projeto para o sistema controlado.

Quanto ao horizonte de predição, algumas peculiaridades devem ser levadas em conta na sua seleção, tais como:



1-Horizonte de Predição Inicial ( $N_1$ ) - Normalmente é selecionado como um, mas nos casos onde o atraso de transporte é perfeitamente conhecido, pode ser ajustado com  $N_1 \leq d$  fazendo com que o esforço computacional seja reduzido.

2-Horizonte de Predição Final ( $N_2$ ) - Geralmente, é tal que este seja maior do que o tempo de subida, porém não superior ao tempo de estabilização ( $t_s$ ) do processo. Para a maioria dos processos estáveis em malha aberta, a dinâmica de malha fechada torna-se mais rápida com a diminuição de  $N_2$ . O aumento de  $N_2$  provoca um aumento da robustez do sistema quanto à presença de dinâmicas não modeladas aumentando, porém, o esforço computacional.

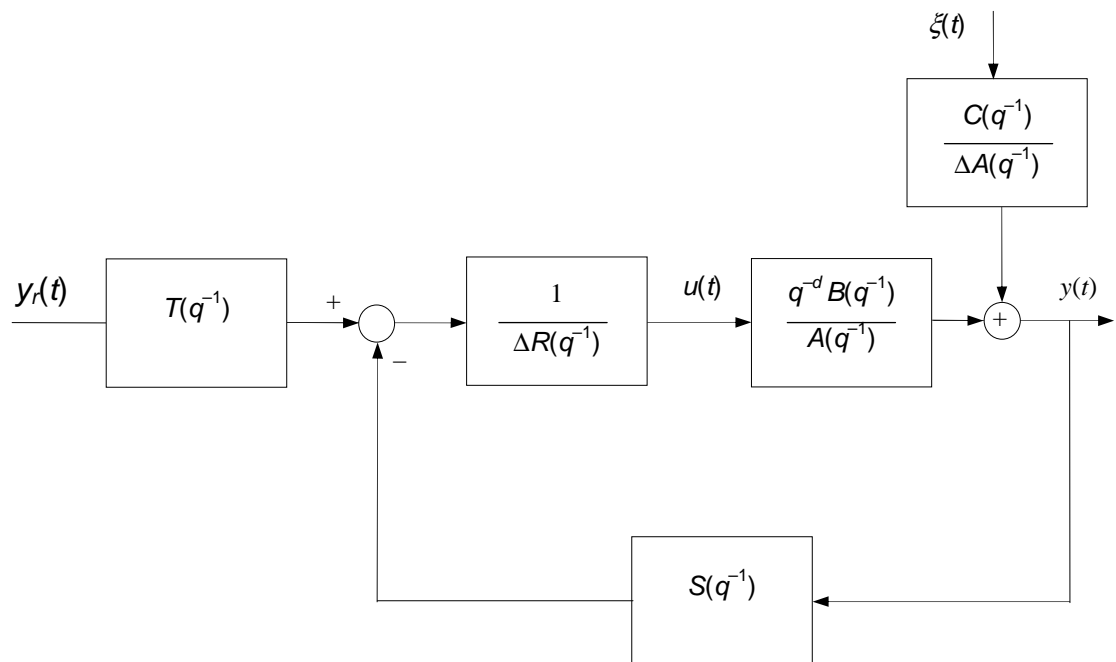
3-Horizonte de Controle ( $N_u$ ) - Valores elevados de  $N_u$ , além de aumentar o esforço computacional, aumenta a dinâmica da ação de controle. Para sistemas estáveis em malha aberta,  $N_u=1$  mostra-se, geralmente, adequado.

4-Ponderação do Controle ( $\Lambda$ ) - A introdução desta ponderação faz com que a magnitude do sinal de controle seja levada em conta na função custo a ser minimizada. Isto provoca uma diminuição dos níveis do sinal de controle podendo causar, também, aumento na sobre-elevação da saída do sistema. A ponderação  $\Lambda$  com um valor diferente de zero contribui positivamente com o condicionamento da matriz obtida no desenvolvimento da lei de controle, possibilitando sua inversão, além de aumentar a estabilidade do sistema quando sujeito a incertezas do modelo.

### 3.1.13 Controle Preditivo Generalizado (GPC)

O controlador preditivo generalizado (GPC) tem como propósito suprir deficiências dos controladores *GMV* (*Generalized Minimum Variance*), os quais apresentam atraso de transporte não é caracterizado facilmente. Os pesquisadores D. W. Clarke, C. Mohtadi e P. S. Tuffs (1987) desenvolveram uma nova estratégia de controle chamada de *GPC* (*Generalized Predictive Control*). O controlador *GPC* utiliza um modelo paramétrico do tipo *CARIMA* e a lei de controle é obtida pela minimização do critério. A estrutura do controlador GPC generalizado é mostrada na figura 3-18.

Figura 3-18 – Estrutura do Controlador GPC



Fonte: Clarke e Mohtadi (1989, p. 83).

Os horizontes de predição e a ponderação do controle são os principais parâmetros de sintonia do *GPC*. A partir da seleção destes parâmetros é possível obter-se diferentes tipos de controladores preditivos e ajustar o desempenho desejado para o sistema controlado. A utilização do *GPC* possibilita tratar processos que possuam atrasos de transporte desconhecidos ou variantes, sistemas sob-restrições, não linearidades, sistemas de fase não-mínima, bem como plantas instáveis em malha aberta. Assim como o *DMC*, na prática, somente o primeiro sinal de controle é aplicado e, a cada iteração, um novo problema de minimização é resolvido (CLARKE, MOHTADI, 1989)

A lei de controle, que satisfaz esta representada na equação 3.14:

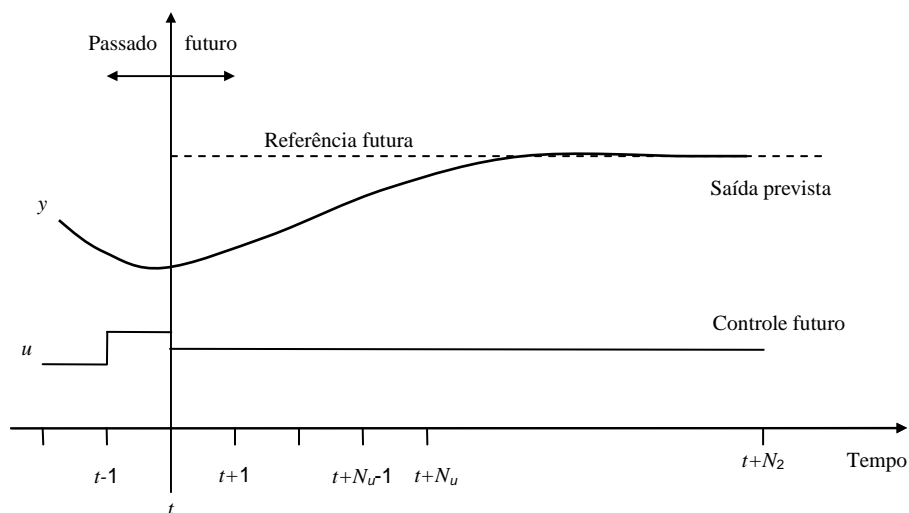
$$R(q^{-1})\Delta u(t) = T(q^{-1})y_r(t + N_2) - S(q^{-1})y(t) \quad 3.14$$

A sintonia do controlador *GPC* pode ser feita com base nas propriedades já apresentadas aos parâmetros do controlador *DMC* podendo-se destacar, ainda, as

seguintes características: capaz de lidar com processos que possuam atrasos de transporte desconhecidos ou variantes, não-linearidades, sistemas de fase não-mínima, bem como plantas instáveis em malha aberta, processos instáveis em malha aberta a seleção de um  $N_2$  elevado pode levar o sistema em malha fechada à instabilidade pois os pólos do sistema em malha fechada tendem aos de malha aberta quando  $N_2 \rightarrow \infty$ ; na presença de restrições o problema de minimização tem que ser resolvido numericamente (CLARKE, ZHANG, 1987).

Outras abordagens com foco em controladores preditivos, onde as melhorias implementadas visam atender a requisitos de processos não lineares e com características de atraso de transporte extremamente crítico. A abordagem de *Mean Level Control* (MLC) trata-se uma lei de controle regulatório aplicado a controlador preditivo generalizado, obtida a partir dos parâmetros de projeto visando aspectos de tempo real e processos não lineares. O controlador de modelo inverso em regime permanente ou controlador *Mean Level* fornece um simples degrau como ação de controle para uma variação do tipo degrau para a referência, o que leva o processo exatamente para a nova referência em regime permanente, figura 3-19 (CLARKE; MOHTADI, 1989).

Figura 3-19 – Abordagem Mean Level Control



Fonte: Clarke e Mohtadi (1989 p. 32).

Utilizando a forma linear geral da lei de controle do GPC que tende ao controlador MLC quando  $N_2 \rightarrow \infty$  se  $N_1 = d = 1$ ,  $N_u = 1$ ,  $\Lambda = 0$ , pode-se observar que o

controlador *MLC* posiciona os pólos de malha fechada na mesma posição dos pólos de malha aberta de um processo estável (MCINTOSH; SHAH; FISHER, 1991). Considerando  $N_1 = d = 1$ ,  $N_u = 1$ ,  $\Lambda = 0$  a lei de controle do *GPC* de acordo com a equação 3.15:

$$\Delta u(t) = [\mathbf{G}^T \mathbf{G}]^{-1} \mathbf{G}^T (\mathbf{Y}_r - \mathbf{f}) \quad 3.15$$

onde

$$\mathbf{G} = [g_0 \quad g_1 \quad \cdots \quad g_{N_2-1}]^T \quad \text{e} \quad \mathbf{G}^T \mathbf{G} = \sum_{i=0}^{N_2-1} g_i^2$$

Para um horizonte de saída de  $N_2$  os elementos da primeira linha de  $[\mathbf{G}^T \mathbf{G}]^{-1} \mathbf{G}^T$  é caracterizado pela equação 3.16:

$$m_j = \frac{g_{j-1}}{\sum_{i=0}^{N_2-1} g_i^2} \quad j = 1, \dots, N_2 \quad 3.16$$

Considerando a forma geral para a lei de controle na equação 3.17:

$$R(q^{-1})\Delta u(t) = T(q^{-1})y_r(t) - S(q^{-1})y(t) \quad 3.17$$

obtem-se

$$R(q^{-1}) = 1 + q^{-1} \left[ \frac{\sum_{j=1}^{N_2} g_{j-1} \bar{G}_j(q^{-1})}{\sum_{i=0}^{N_2-1} g_i^2} \right], \quad S(q^{-1}) = \left[ \frac{\sum_{j=1}^{N_2} g_{j-1} F_j(q^{-1})}{\sum_{i=0}^{N_2-1} g_i^2} \right] \text{e} \quad T(q^{-1}) = \left[ \frac{\sum_{j=1}^{N_2} g_{j-1}}{\sum_{i=0}^{N_2-1} g_i^2} \right]$$

Pode-se escrever um conjunto similar de equações para um horizonte de saída  $N_2 + 1$  e, fazendo a diferença (para um  $N_2$  de valor elevado), têm-se na equação 3.18:

$$R(q^{-1}) = \frac{1}{g_{N_2}} [g_{N_2} + q^{-1} \bar{G}_{N_2+1}(q^{-1})], \quad S(q^{-1}) = \left[ \frac{F_{N_2+1}(q^{-1})}{g_{N_2}} \right] \quad 3.18$$

$$\text{e } T(q^{-1}) = \left[ \frac{1}{g_{N_2}} \right]$$

O polinômio característico para o sistema em malha fechada é expresso na equação 3.19:

$$P_{mf}(q^{-1}) = R(q^{-1})A(q^{-1})\Delta + q^{-1}B(q^{-1})S(q^{-1}) \quad 3.19$$

Substituindo  $R(q^{-1})$  e  $S(q^{-1})$  o polinômio característico na equação 3.20, torna-se:

$$P_{mf}(q^{-1}) = \frac{g_{N_2}A(q^{-1})\Delta + q^{-1}\left[\bar{G}_{N_2+1}A(q^{-1})\Delta + B(q^{-1})F_{N_2+1}\right]}{g_{N_2}} \quad 3.20$$

Considerando a identidade polinomial na equação 3.21:

$$1 = E_{N_2+1}(q^{-1})A(q^{-1})\Delta + q^{-(N_2+1)}F_{N_2+1}(q^{-1}) \quad 3.21$$

Obtem-se na equação 3.22:

$$E_j(q^{-1})B(q^{-1}) = G_j(q^{-1})C(q^{-1}) + q^{-j}\bar{G}_j(q^{-1}) \quad 3.22$$

Pela manipulação das equações 3.21 e 3.22 obtém-se a equação 3.23:

$$B(q^{-1}) = G_{N_2+1}(q^{-1})A(q^{-1})\Delta + q^{-(N_2+1)}\left[\bar{G}_{N_2+1}(q^{-1})A(q^{-1})\Delta + B(q^{-1})F_{N_2+1}(q^{-1})\right] \quad 3.23$$

A partir da equação 3.23 e rearranjando, obtém-se equação 3.24: 3.20

$$P_{mf}(q^{-1}) = \frac{A(q^{-1})\Delta\left\{g_{N_2} + q^{N_2}\left[B(q^{-1})/A(q^{-1})\Delta - G_{N_2+1}\right]\right\}}{g_{N_2}} \quad 3.24$$

Uma vez que os coeficientes de  $B/A\Delta$  obtém-se a equação 3.25:

$$G_{N_2-1}(q^{-1}) = g_0 + g_1q^{-1} + \dots + g_{N_2}q^{-N_2} \quad 3.25$$

Estes coeficientes são a resposta ao degrau, o polinômio característico pode ser reescrito na equação 3.26:

$$P_{mf}(q^{-1}) = \frac{A(q^{-1})\Delta [g_{N_2} + g_{N_2+1}q^{-1} + \dots]}{g_{N_2}} \quad 3.26$$

Levando ao limite quando  $N_2 \rightarrow \infty$  para um processo estável em malha aberta pode-se reescrever a equação em 3.27:

$$P_{mf}(q^{-1}) = \lim_{N_2 \rightarrow \infty} \left\{ \frac{A(q^{-1})}{g_{N_2}} [g_{N_2} + (g_{N_2+1} - g_{N_2})q^{-1} + (g_{N_2+2} - g_{N_2+1})q^{-2} + \dots] \right\} = A(q^{-1}) \quad 3.27$$

Verifica-se que, para um controlador *MLC* atuando sobre um processo estável, os pólos de malha fechada permanecem nas mesmas posições dos pólos de malha aberta.

### 3.1.14 Estratégias de Controle Preditivo Aplicado a Processos Térmicos

O controlador preditivo requer além do conhecimento para a construção do algoritmo de regulatório, também demanda um entendimento em relação ao modelo e/ou função de transferência (RICHALET, 1993). Esta afirmação de Richalet (1993) representa o limite tênue do sucesso e/ou comprometimento de desempenho do controle regulatório avançado em função de um modelo equivocado. Camacho e Bordons (1999) referiram-se ao GPC como talvez um dos mais populares métodos de MPC aplicado ao controle de processos. Clarke, Monhtadi e Tuffs (1987) elaboraram o generalized predictive control (GPC) o qual que eliminava o *off-set* de maneira natural devido ao modelo interno CARIMA (controlled auto-regressive and integrated moving average). O GPC é uma evolução do controle de variância mínima (*control minimum variance, MVC*), desenvolvido por Karl J. Åström (1997), que deriva da teoria de predição ótima.

Carelli (2008) em seu trabalho analisou a resposta dos controladores PID clássico e preditivo em relação ao desempenho em processos determinístico e estocástico O estudo foi aplicado ao controle do primeiro leito de um reator de hidro-

tratamento de diesel, simulado a partir de um modelo fenomenológico. As malhas de controle envolvidas neste estudo são responsáveis pelo controle de temperatura do leite, ou seja, o controle regulatório influencia diretamente na eficiência térmica do reator de hidro-tratamento.

Segundo Carelli (2008) os controladores de realimentação foram sintonizados por diferentes métodos, desde heurísticos até baseados em modelo interno. O controle preditivo utilizado no estudo foi o Controle Preditivo Generalizado (GPC), baseado em modelo interno auto-regressivo, integrado e de média móvel. O desempenho determinístico foi avaliado através das integrais ao longo do tempo do produto do tempo pelo erro absoluto da variação quadrática das ações de controle (CARELLI, 2008). Em relação ao controlador preditivo, estudou-se ainda a relação entre seus desempenhos em relação à variação da trajetória de referência e no modelo interno, procedendo-se ao monitoramento e diagnóstico de seu desempenho. Como resultado, constatou-se, para os cenários estudados, que o GPC foi o controlador que melhor contrabalanceou o desempenho determinístico e estocástico. Tais resultados podem ser aplicados a outros processos químicos, uma vez que a malha investigada é comum em processos térmicos, e apresenta uma dinâmica de 1ª ordem com tempo morto (CARELLI, 2008).

Carelli (2008) adotou a metodologia de simulação da unidade hidro-tratamento com o objetivo de obter maiores informações sobre o processo, de maneira a propiciar uma melhor decisão com relação à estratégia de controle mãos vantajoso sobre os aspectos de eficiência do controle térmico.

Os resultados obtidos na simulação feita por Carelli (2008) apontam, que o controlador preditivo GPC manteve a variável controlada dentro dos limites e tolerância do processo de acordo com os requisitos de desempenho estabelecidos pelo método determinístico. Porém, Carelli (2008) destaca em seu trabalho que o modelo de primeira ordem com tempo morto, se houver é influenciado em relação aos distúrbios aleatórios os quais influenciam na variabilidade da variável controlada.

Carelli (2008) destaca em seu trabalho a necessidade de um estudo aprofundado para desenvolvimento de metodologias de obtenção do modelo do processo, implementações de sistemas especialistas ou baseados em redes neurais que possibilitem monitorar automaticamente o desempenho do controle regulatório diagnosticam do comportamento de malhas de controle e propondo soluções quando o desempenho é prejudicado, ampliação da análise para casos

reais e referentes ao processo completo de hidro-tratamento, estudo das técnicas de avaliação, monitoramento e diagnóstico em contexto multivariável, análise do efeito de outros parâmetros de sintonia do GPC (horizontes parâmetros da função objetivo). Carelli (2008) destaca a necessidade de uma maior conscientização ambiental, em relação à concepção e controladores regulatórios com maior eficiência no controle de sistemas de geração de energia térmica.

Entre as varias técnicas utilizadas no controle preditivo, há uma convergência entre as mesmas, o sucesso e/ou desempenho do projeto do controlador preditivo depende em sua grande maioria absoluta, da aderência do modelo a dinâmica do processo (AGUIRRE; COELHO; CORRÊA, 2005).

Baseado nesta premissa Santos (2007) desenvolveu pesquisa relacionada com “controle preditivo não-linear para sistemas de Hammerstein”. O modelo de Hammerstein propicia a representação adequada e aderente em relação aos equipamentos de processos da indústria química e petroquímica tais como: reatores, colunas de destilação, trocadores de calor, caldeiras e fornos, entre outros equipamentos do processo de refino (ABONYI et al, 2000; AGUIRRE; COELHO; CORRÊA, 2005).

De acordo com Santos (2007) à aplicação de algumas das técnicas de identificação foi realizada sobre um processo com saturação na entrada, apresentando desempenho adequado.

As estratégias para resolver o problema da multiplicidade do sinal de controle ótimo para controladores preditivos baseados no modelo de Hammerstein foram aplicadas sobre o modelo de um trocador de calor e seu desempenho mostrou-se satisfatório.

A técnica proposta por Santos (2007) foi baseada em uma aproximação por série de Taylor, apresentou desempenho adequado, comparável àquelas encontradas na literatura. Santos (2007) desenvolveu o estudo a partir da simulação de um reator *CSTR* com o propósito de obter a identificação. Segundo Santos (2005), ficou explicito que o modelo de Hammerstein possui limitações em relação a sua capacidade de representar não-linearidades de processos complexos. Segundo Santos (2007), apesar das dificuldades encontradas em relação à simulação em planta, o desempenho do sistema de controle preditivo foi satisfatório e os modelos obtidos mostraram-se representativos. Os resultados apresentados demonstraram que para sistemas térmicos o método de Hammerstein mostrou-se satisfatório



(SANTOS , 2007) As principais contribuições apontadas pelo trabalho de Santos (2007) são: a demonstração através de estudos de simulação da eficácia das técnicas de seleção de ordem dos modelos de Hammerstein na representação de processos não-lineares; demonstração das técnicas de identificação para o modelo de Hammerstein e comprovação que a técnica dos Mínimos Quadrados com Restrições apresenta desempenho similar àquelas estudadas; aplicação na estratégia de controle preditivo baseado com perturbações mensuráveis.

Segundo Santos (2007) os principais tipos de modelos discretos para sistemas S/SO foram apresentados e suas características fundamentais foram destacadas de forma a permitir a seleção do modelo mais adequado a uma determinada aplicação. Santos (2007) destacam em seu trabalho, que para sistemas térmicos de acordo com a proposta de estudo (processo térmico), o método aplicado mostrou-se mais adequado. Nas unidades de refino de petróleo o resultado econômico e ambiental esta diretamente inter-relacionada com a eficiência térmica do processo. Por outro lado a eficiência da geração de energia térmica depende da estratégia de controle adotada e principalmente da aderência do modelo em relação à dinâmico processo. Uma identificação mal sucedida e/ou equivocada do modelo e/ou dinâmica do processo terá como consequência um péssimo desempenho do sistema regulatório (Controlador Fuzzy, Neural, Preditivo, etc.) (SANTOS, 2007).

### **3.1.15 Considerações**

Neste capítulo buscou-se apresentar as principais alternativas tecnológicas relacionadas com o controle avançado aplicado direta e/ou indiretamente no controle da eficiência energética de sistemas e/ou processos de geração de energia térmica. Ao longo do capítulo percebe-se que o aspecto relativo à identificação do modelo e/ou função de transferência é considerada parte crucial para o sucesso da aplicação. No caso específico do sistema de controle Fuzzy PID, a grande maioria das aplicações apresentadas é construída em plataformas de controladores lógicos programáveis (CLP).

Segundo Kinney (2012) em seu artigo que, grande parte dos sistemas de controle aplicados para otimização e regulação da geração de energia térmica são sub-utilizado (sistemas de controle distribuído, controladores lógicos programáveis). De acordo com o estudo de caso apresentado por Kinney (2012), a respeito de

método de otimização de sistemas de combustão, uma grande parte dos mecanismos de combustão aplicados a equipamentos térmicos, operam com baixo rendimento, ou seja, elevando o consumo de combustível e emissão de poluentes.

Segundo Kinney (2012), um dos fatores que corroboram para eficiência energética dos sistemas de térmicos (Fornos, Caldeiras, etc) este diretamente relacionado com a instrumentação de campo e sistema regulatório. Kinney (2012) pontua em seu artigo, que não é suficiente investir somente em sistemas de controle avançado com o objetivo de melhorar o desempenho e eficiência energética faz-se necessário, também, capacitar pessoas para prover habilidades e competência na operação de equipamentos de geração de energia térmica.

Observa-se que a preocupação principal é a solução do problema de controle, isto é, não evidenciado em algumas publicações da área de controle a preocupação com a confiabilidade dos sensores responsáveis pela aquisição da variável de processo e elementos finais de controle, executores da lógica e/ou regulação da variável controlada. Pretende-se tratar deste tópico no próximo capítulo uma vez que a baixa confiabilidade destes dispositivos pode corroborar para uma baixa eficiência energética do processo de geração de energia térmica. Ao longo do capítulo é utilizado com ênfase à expressão “eficiência energética”, cabe pontuar que este conjunto de palavras representa a somatória dos termos que norteia o desenvolvimento macroeconômico e sustentável, isto é, atendimento aos requisitos ambientais e sociais (preservação do meio ambiente e da vida em todas as suas manifestações).

Segundo Kinney (2012) em seu artigo que, grande parte dos sistemas de controle aplicados para otimização e regulação da geração de energia térmica são sub-utilizado (sistemas de controle distribuído, controladores lógicos programáveis). De acordo com o estudo de caso apresentado por Kinney (2012), a respeito de método de otimização de sistemas de combustão, uma grande parte dos mecanismos de combustão aplicados a equipamentos térmicos, operam com baixo rendimento, ou seja, elevando o consumo de combustível e emissão de poluentes. Segundo Kinney (2012), um dos fatores que corroboram para eficiência energética dos sistemas de térmicos (Fornos, Caldeiras, etc) este diretamente relacionado com a instrumentação de campo e sistema regulatório.

O termo eficiência energética relacionado com o sistema de geração de energia térmica remete para o uso racional de energia, com baixo índice de

reprocessamento, com segurança e respeitando restrições impostas pela legislação ambiental.

É imperativo que pesquisadores, engenheiros de automação e gestores de negócio, incorporem metodologias e procedimentos com foco em conservação de energia nos empreendimentos de adequação equipamentos térmicos e/ou construção de novas unidades industriais. A necessidade de investir na capacitação em todas as camadas do processo produtivo com visão em eficiência energética deve contribuir para a redução e uso racional dos recursos naturais. Todos os fatores relacionados com a necessidade de manutenção da rentabilidade do negócio e atendimento aos requisitos da legislação ambiental, impõem restrições à produção e à qualidade de produtos, os quais determinam especificações para plantas industriais que só podem ser obtidas a contento com a aplicação eficaz de técnicas avançadas de controle de processo e automação industrial. Quanto menor a dispersão de, ou seja, variabilidade das variáveis de processo em relação ao valor médio desejado, o desempenho do processo térmico será satisfatório. Este sem dúvida é a justificativa para o investimento em camadas de controle automático de processo (CLARKE e MOHTADI, 1989). Por esta razão pretende-se no capítulo quatro apresentar a análise de eficiência energética com base na camada de controle. A melhoria do desempenho de processos térmicos (fornos e caldeiras), por meio de soluções de controle, representa um custo menor em relação aos investimentos necessários para implementação de projeto e obra para modificações de hardware (tubulação, sopradores, permutadores, maçaricos, etc.), somada a necessidade de realizar parada de interrupção de produção para possibilitar as alterações necessárias o que resulta em um grande esforço de planejamento mobilização de grande contingente de mão de obra, riscos de acidente pela movimentação de peças e equipamentos de grande porte (lucro cessante, etc.).

#### 4 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO FORNO PETROQUÍMICO

Nos meados da década de 70, surgiu a necessidade do uso racional da energia, seja ele no âmbito industrial ou comercial. A sensibilização para a necessidade de uso com eficiência de energia teve como fator motivacional a elevação de preços dos combustíveis. O aumento de preço do petróleo foi substancial em virtude do embargo árabe. Muito embora o aumento de preço da commodity petróleo seja nocivo a praticamente todos os consumidores, no seguimento indústria os efeitos são particularmente impactantes devido ao volume de combustível consumido em toda cadeia de valor. Desde então a chamada “conservação de energia” e eficiência energética tem sido considerada como um recurso adicional, em muitos casos mostrando maior economicidade do que as alternativas disponíveis. A indústria de petróleo tem investido recursos e programas de conservação e eficiência energética, através de pesquisa e desenvolvimento de metodologias e tecnologia de maneira a tornar o processo produtivo eficiente sobre os aspectos ambiental e econômico. O acompanhamento periódico das condições de desempenho de equipamentos de processos industriais em relação à sua eficiência térmica é importante, uma vez que em torno de 20% dos custos relativos à cadeia de produção estão diretamente relacionados com o consumo de combustível utilizado para produção de geração de energia térmica (SOUZA, 2008). O termo eficiência energética aplica-se em todas as camadas de controle, ou seja, desde a seleção do equipamento em relação ao rendimento térmico, procedimentos de projeto com vista à eficiência térmica, padrão de instalação de acordo com os procedimentos estabelecido pelo fabricante, seleção e projeto da estratégia de controle a ser adotada (controle PID, Fuzzy, MPC, DMC, Redes Neurais, Laplace, etc), seleção de sensores de campo e elementos finais de controle, sistema de proteção de chama e capacitação de pessoal de operação e manutenção.

Neste contexto pretende-se analisar a eficiência energética de um forno petroquímico de 50MW, na camada relacionada com o desempenho das malhas de controle e/ou regulação da combustão, uma vez que a sua instabilidade do controle penaliza os indicadores de ordem econômica e ambiental, de acordo com a explanação no decorrer do parágrafo anterior.

Contudo, identificou-se inicialmente o rendimento térmico do forno através da relação entre energia cedida pelo sistema de combustão e energia incorporada e/ou

absorvida pelo gás de processo. Esta caracterização do rendimento foi pertinente visto que servirá como marco referencial de ganho mensurável quando da aplicação de melhoria no sistema de regulação e controle da combustão.

No subitem 4.1 discorrerá sobre os aspectos metodológicos adotados.

#### 4.1 METODOLOGIA

Adotou-se inicialmente a verificação do comportamento regulatório da malha de temperatura de gás de processo, saída do forno e entrada no reator. De posse deste resultado efetuou-se o planejamento para desenvolvimento do processo de identificação da função de transferência do Forno. No período de aquisição das informações relativas à dinâmica do equipamento analisado (Forno Petroquímico), foi desativado o módulo de compreensão de dados do sistema *Plant Information* (P&I). Esta ação adotada na ocasião teve como objetivo diminuir a incerteza de medição relativo à constante de tempo atraso de transporte, entre outros (OGATA, 2003).

Cabe neste momento esclarecer que o sistema de aquisição de dados *Plant Information* está configurado como elemento passivo, não interagindo com o processo, podendo evidentemente ser ajustado de modo a interagir com as malhas de controle residentes no SDCD (Sistema Digital de Controle Distribuído), obviamente, caso o usuário tenha interesse em desenvolver um controle avançado, sistema Laplace, etc. Esta opção não está ativa no momento dos testes, portanto não representando risco algum ao desempenho da planta.

Durante o processo de planejamento da intervenção para identificação do modelo, procurou-se envolver as equipes de operação e engenharia de otimização desde a seleção do método a ser adotada bem como a negociação junto à produção com relação ao período de execução, amplitude da perturbação a ser introduzida no processo e período de duração do teste.

É pertinente citar que, por tratar-se de equipamento imprescindível para o processo de produção de derivados de petróleo, a interrupção de operação representa a parada imediata de todo o processo produtivo (unidades de tratamento de gás, reator, sistema de tratamento de gás ácido, etc), impactando negativamente os indicadores econômicos ambientais. Por esta razão fez-se necessário o planejamento de acordo com os seguintes etapas:

4.0 Obtenção do rendimento do sistema de combustão em relação à energia cedida pelos combustíveis e energia absorvida pelo gás de processo. Esta métrica visa estabelecer um referencial em relação condições ideais de operação do forno.

4.1 Objetivo pretendido, detalhamento para os envolvidos no processo de identificação (Engenharia de Otimização, Operadores e Supervisores da produção);

4.2 Estabelecimento do grau de liberdade e duração do distúrbio a ser aplicado na malha de temperatura (malha mestre);

4.3 Definição do método de identificação da função de transferência do Forno;

4.4 Avaliação da condição de processo em relação à representatividade da faixa de operação do equipamento, ou seja, limite inferior e superior da curva de projeto de operação do Forno (evitar determinar modelo e/ou função de transferência abaixo ou acima da curva de operação do processo, condições de partida e parada da unidade, etc.);

4.5 Estudo e análise (antes do teste) de funcionamento das malhas de controle, interação entre as mesmas, propiciando a previsibilidade do comportamento dinâmico do forno e equipamentos interligados com a mesmo, tomada de decisão antecipatória durante os testes (introdução de perturbação e/ou distúrbios acima do previsto);

4.6 Avaliações da operacionalidade do sistema intertravamento e proteção do Forno de modo a garantir uma intervenção segura e com o menor impacto na estabilidade do processo de geração de energia térmica;

4.7 Compilação e análise dos resultados obtidos em relação a eficiência de controle do processo de geração de energia térmica (eficiência energética);

4.8 Proposta de solução para a melhoria do controle regulatório de combustão com vistas a melhoria da eficiência energética.

## 4.2 EFICIÊNCIA TÉRMICA DO FORNO

A equação geral da conservação e transporte da térmica é obtida a partir da primeira lei da termodinâmica de acordo com a equação 4.0:

$$\left. \frac{dE}{dt} \right|_{\text{sist}} = Q - W \quad (4.0)$$

Onde dE é a variação de energia térmica

Q= fluxo de calor

W= trabalho realizado

dt= variação temporal

Esta equação estabelece que a variação de energia **E** (dE) para um determinado sistema, é igual à soma dos fluxos de calor e trabalho que transpõem a fronteira do sistema. Em relação à formulação da primeira lei da termodinâmica, mantém-se a convenção de sinal, ou seja, o calor recebido em relação ao trabalho exercido pelo sistema é consequentemente positivo. Considera-se também na primeira lei da termodinâmica que o calor rejeitado e o trabalho recebido pelo sistema são negativos, por convenção (REYNOLDS; PERKIS, 1977). A equação 4.0 serviu como base para o cálculo do rendimento térmico, onde que Q energia cedida e W trabalho realizado, onde a energia cedida está relacionada com a carga térmica fornecida pelos combustíveis (óleo e gás combustíveis - unidade Kcal).

Para calculo da eficiência térmica do Forno, primeiramente foi estabelecida a relação entre massa de energia térmica disponibilizada pelos combustíveis para posterior calculo da eficiência energética. Onde o Pci representa o poder calorífero inferior dos respectivos combustíveis. O calculo da carga térmica (Ct) foi obtido de acordo com a equação 4.1:

$$(P_{ci} \text{ GC} \times P_{ci} \text{ Vazão GC}) + (P_{ci} \text{ do OC} \times Vazão \text{ GC} = Ct \quad (4.1)$$

Onde, **Pci** representa o poder calorífero inferior dos respectivos combustíveis (gás e óleo);

- GC e GO correspondem as Vazão instantânea do Gas e óleo

*combustível;*

- O produto desta equação resulta na carga térmica fornecida para a massa de gás de processo.

Onde carga térmica é:  $C_t$ ;

A tabela 4-0 disponibiliza os valores correspondente a um período de seis meses de acompanhamento da carga térmica fornecida para o gás de processo.

Tabela 4-0 – Carga Térmica do Forno

PCI GCI Kcal/kg	Vazão GC kg/h	PCI OC Kcal/kg	Vazao do OC kg/h	$C_t$
9000	870	7500	2400	25,830
8900	780	7400	2180	23,074
8600	870	8400	2450	28,062
8900	865	7800	2380	26,263
9500	890	8500	2670	31,150
10000	879	8877	2670	32,492

\*período de amostragem seis meses

Fonte: O autor.

De posse dos valores da carga térmica ( $C_t$ ), foi possível determinar a eficiência térmica do Forno em relação a energia fornecida e absorvida , ou seja, convertida em trabalho (neste caso a temperatura final do gás de processo). Através da equação 4.2 calculou-se o rendimento do térmico do Forno, onde:

$$\eta = \text{rendimento \% Perkins}$$

Transferência de energia desorganizada, que ocorre entre sistemas a temperaturas diferentes, prolongando-se, espontaneamente, através de um meio material, do sistema a temperatura mais elevada para o sistema a temperatura mais baixa (REYNOLDS; PERKIS, 1977). A quantidade de energia transferida sob a forma de calor pode ser quantificada, desde que se conheça a massa do sistema (m) que cede ou recebe a energia, a sua capacidade térmica mássica (c) e a variação da temperatura que ocorreu ( $\Delta T$ ):

$$Q = mc\Delta T \quad (4.2)$$

Onde:

$Q$ = quantidade de calor que foi absorvida, pelo gás de processo;

$\Delta T$ = diferencial de temperatura ( $Q_c$  e  $Q_a$ )



$m$  = vazão mássica do gás de processo (m);

$Q_c$  (qtde. de calor cedida) =  $m$  (em kg/s) x  $P_{ci}$  (em kJ/kg)

$Q_a$  (qtde. de calor absorvida) =  $m$  (em kg/s) x  $^{31}C_p$  (gás de processo, kJ/kg.K) x  $\Delta T$  (Kelvin)

Eficiência energética em % =  $((Q_c - Q_a)/Q_c) \cdot 100$

Para obtenção dos valores em kCal, dividir dividido por 4,18 para obter o kJ.

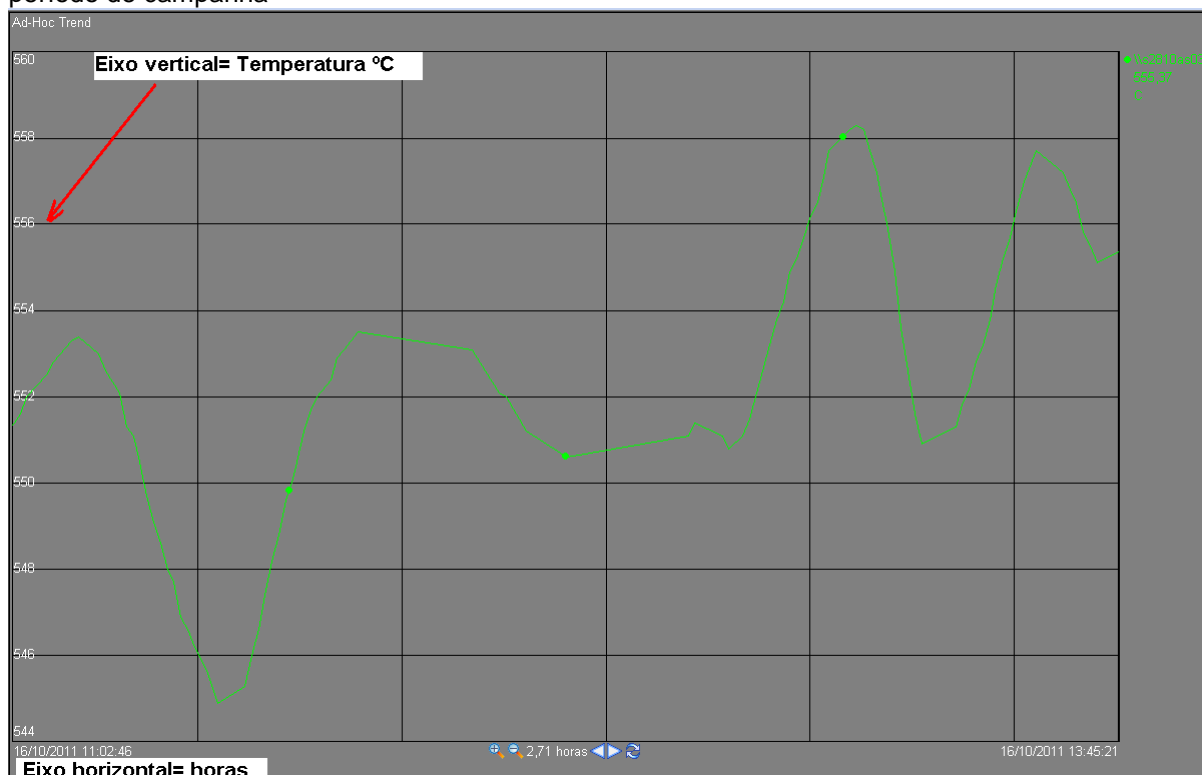
Do resultado obtido na equação 4.2 são subtraídas as perdas computadas através de um Fator  $K$  ( $F_k$ ). Desta maneira o rendimento encontrado ( $\eta$ ) em relação a eficiência energética do forno foi encontrado baseado nas informações de processo por meio do sistema P&I (Plant Information) e SDCD (Sistema Digital de Controle Distribuído).

Na ocasião durante a execução do planejado, obteve-se informações da engenharia de produção, o sistema de combustão deveria manter uma carga térmica em torno de 33 a 37 MKcal (milhões de Kilo Calorias). Esta métrica deveria garantir uma temperatura de saída do gas de processo próximo a 565 °C, valor correspondente ao set-point do controlador de temperatura (malha de controle mestre). No gráfico da figura 4-0 é possível observar a grande variação da carga térmica do Forno ao longo do período de campanha, na ocasião dos testes.

---

<sup>31</sup> O Poder Calorífico é a quantidade de energia por unidade de massa (ou de volume no caso dos gases) libertada na oxidação de um determinado combustível. Existem duas formas de considerar o poder calorífico: Poder Calorífico Superior (CpS) e Poder Calorífico Inferior (CpI). O Cp. I só por o primeiro termo, isto é, a energia libertada na forma de calor. O Cp.S é dado pela soma da energia libertada na forma de calor e a energia gasta na vaporização da água que se forma numa reação de oxidação (REYNOLDS; PERKIS, 1977).

Figura 4-0 – Observa-se no gráfico uma grande variação da carga térmica do Forno ao longo do período de campanha



Fonte: O autor.

Faz necessário ponderar neste momento, que não foi considerado como escopo deste trabalho, desenvolver uma metodologia de cálculo de eficiência energética e/ou aprofundar nos mecanismos computacionais para obtenção dos resultados do rendimento do forno, uma vez que estas informações estão disponíveis no sistema P&I. O diagnóstico energético é considerado a aplicação de um conjunto de técnicas que permitem determinar o grau de eficiência com que é utilizada a energia fornecida para um determinado sistema (forno, caldeira, Reator, turbina, etc). Trata-se de um tema de interesse da comunidade científica, industrial e governamental, podendo ser objeto de trabalhos futuros, tema que poderá ser explorado com maior profundidade.

Foi considerada neste trabalho a avaliação da eficiência energética em relação à contribuição dos sistemas de controle regulatório de combustão para o atendimento dos indicadores econômicos e ambientais. De acordo com os relatórios de acompanhamento extraídos P&I, o rendimento do Forno ficou em torno de 82% (percentuais). O rendimento estabelecido pelo fabricante do Forno dentro das condições de projeto é de 92%.

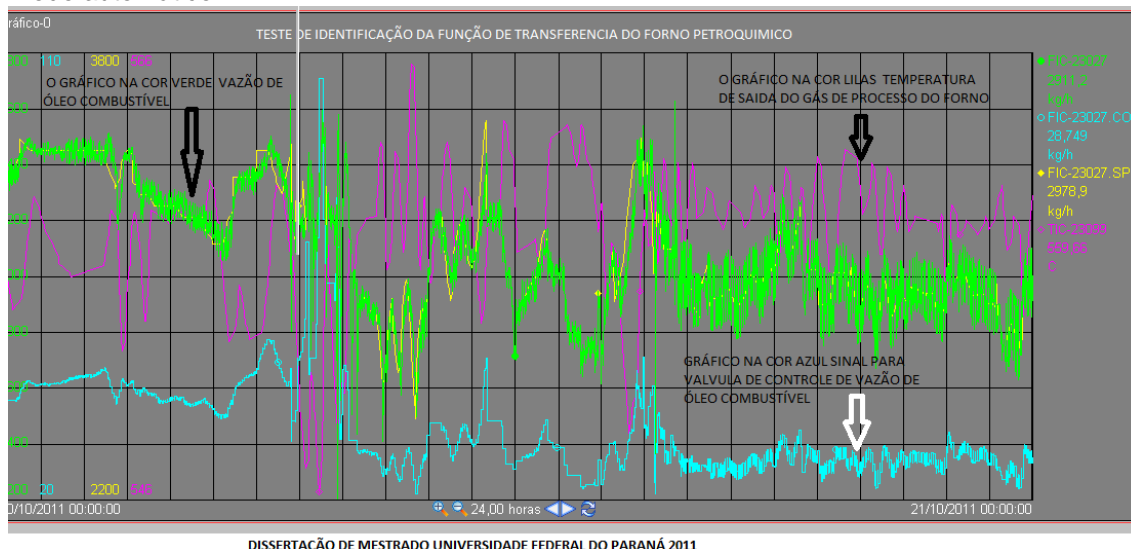
O resultado foi referente ao período compreendido entre Outubro de 2011 a Março de 2012 (referência para o cálculo da média ponderada do desempenho e/ou eficiência energética do forno). É pertinente citar que foram expurgados os períodos de paradas para manutenção no forno, corte de energia elétrica e/ou decorrentes de falhas de outros equipamentos interligados ao forno (Reator, unidade de destilação, etc.). Neste trabalho procurou-se identificar a contribuição da variabilidade das malhas de controle do processo de combustão, uma vez que estas representam um ganho significativo para a obtenção das metas de economia de energia e atendimento dos índices de emissões atmosféricas (SOUZA, 2008).

#### 4.3 COMPORTAMENTO DINÂMICO DO FORNO

Após o planejamento prévio com todas as etapas definidas para avaliação da eficiência energética do forno petroquímico em relação ao desempenho do controle regulatório, procedeu-se na aquisição de dados relativos à variável temperatura do gás de processo e vazões de combustíveis. Como destacado no capítulo segundo, trata-se de uma estratégia de controle na configuração mestre-escravo, onde a malha de temperatura comanda remotamente o *set-point* da malha de vazão de óleo e gás combustível. A variação do sinal de saída para reposicionamento das vazões de combustíveis depende da variação da temperatura na saída do duto de gás de processo do Forno para reator de pirólise. Na ocasião da aquisição de dados do processo, a malha de temperatura estava na condição manual, (dependente da ação do operador para atuar no processo). Segundo informações da produção, esta condição de operação, ou seja, em modo manual ocorre em decorrência da instabilidade quando há distúrbios provocados pela elevação e/ou redução da vazão de gás de processo (entrada do forno e/ou saída do forno). Procedeu-se na solicitação de automatizar a malha de controle de temperatura de modo a evidenciar a instabilidade do controle frente aos distúrbios introduzidos pela redução e/ou elevação da vazão de carga do Forno, instabilidade do reator, etc. Porém, antes de solicitar a mudança na condição do modo de operação do controlador, garantiu-se que não haveria nenhuma condição de risco operacional em decorrência desta mudança para sistema servo (controlador operando com ajuste de *set-point*). Na 4-1 observou-se o comportamento dinâmico da malha controle de temperatura no modo automático na ocasião do teste. Notou-se uma variação acentuada na temperatura,

de acordo com o gráfico na cor lilás, demonstrando um comportamento instável da variável de processo (temperatura). Outra constatação feita durante o período de teste foi em relação às variáveis manipuladas (vazão de combustíveis), apresentavam um comportamento instável, ou seja, oscilações abruptas das vazões de combustíveis.

Figura 4-1 – Comportamento da malha de controle de temperatura do gás de processo malha em modo automático



Fonte: O autor.

A instabilidade encontrada durante a fase de aquisição de dados relativos ao controle regulatório do processo de combustão mostrou que há uma necessidade de imediata de proceder na avaliação dos sensores e atuadores, pois parte deste comportamento oscilatório poderia ter origem no baixo desempenho dos dispositivos de campo.

#### 4.4 IDENTIFICAÇÃO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO FORNO

A escolha do método de identificação da função de transferência do forno e/ou modelo, levou em consideração as seguintes restrições: amplitude do degrau, duração e o grau de liberdade o qual o processo admitiria.

Dentre as várias metodologias disponíveis para o processo de identificação optou-se pelo método de Ziegler, Nichols e Rochester (1942) (malha aberta). As razões da escolha da aplicação do método de Ziegler, Nichols e Rochester (1942) foi em função do domínio da metodologia e principalmente em decorrência do limite de variação imposto pelo processo (5% de variação), em relação à aplicação do

degrau, onde o procedimento de Ziegler, Nichols e Rochester (1942) permite uma menor variação. Outra ponderação a respeito da adoção do método de Ziegler, Nichols e Rochester (1942) para o propósito de identificação da função de transferência do forno, foi devido ao fato de se tratar de uma metodologia consagrada e extremamente difundida na comunidade científica e industrial.

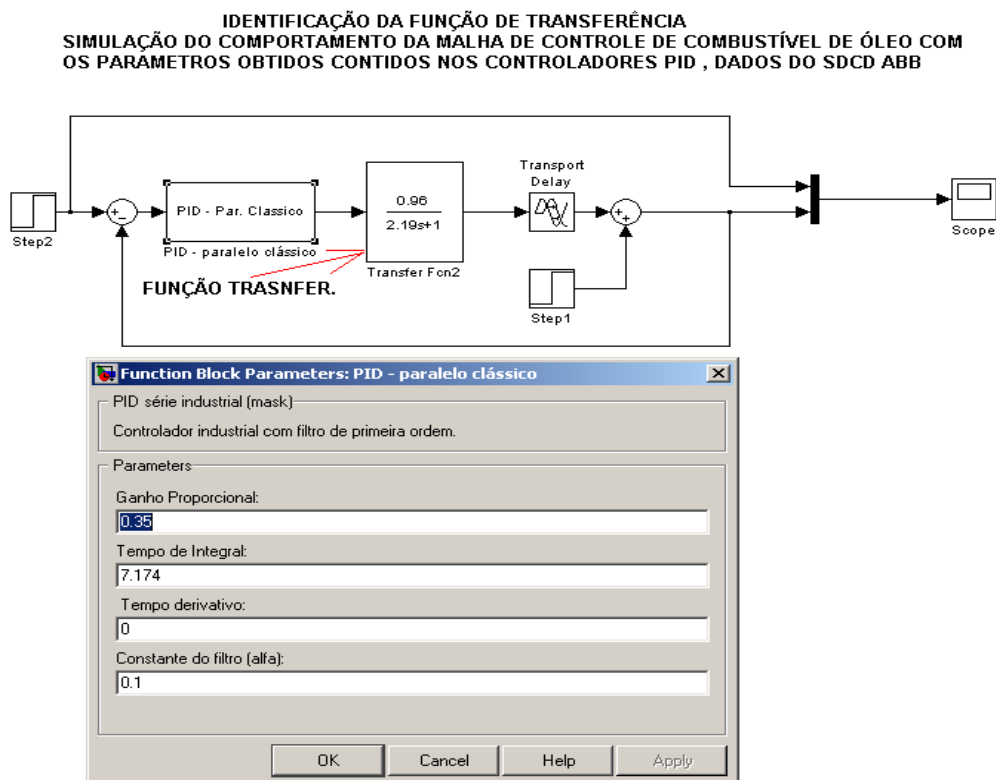
Com relação aos métodos de identificação propostos por Ziegler, Nichols e Rochester (1942), estes visam obter resposta em relação ao comportamento do processo. Ziegler, Nichols e Rochester (1942) propuseram dois métodos distintos: resposta ao degrau em malha aberta e resposta ao degrau em malha fechada.

Estes métodos diferem no que diz respeito à natureza da informação sobre a dinâmica do processo que é exigida por cada um deles (OGATA, 2003). Caracteriza-se como segundo método a resposta ao salto, ou método do domínio do tempo, requer o conhecimento de duas grandezas que caracterizam a resposta ao salto de um processo (OGATA, 2003).

O método de Ziegler & Nichols pressupõe que o processo pode ser modelado por um sistema de primeira ordem mais atraso de tempo como a função de transferência (OGATA, 2003).

A aplicação do método de Ziegler, Nichols e Rochester (1942) para o processo de identificação (SISO), foi implementado, alterando o modo de operação da malha de controle de temperatura para manual, objetivando inibir a atuação deste controlador sobre as malhas vazões de combustíveis (óleo e gás). As malhas de controle de vazão de combustíveis foram mantidas na condição manual, de modo a permitir a introdução de distúrbio através da manipulação dos elementos finais de controle (válvula de controle de vazão de combustíveis). Outro aspecto relevante em relação ao processo de identificação da função de transferência do processo (Forno) e que forma inibidas as ações de controle PID dos respectivos reguladores, de maneira a promover o teste em sistema de malha aberta (OGATA, 2003). Após a aplicação do degrau em malha aberta na malha de vazão de foi possível obter à reação do processo com as informações de atraso de transporte, constante de tempo. A figura 4-2 mostra a função de transferência encontrada.

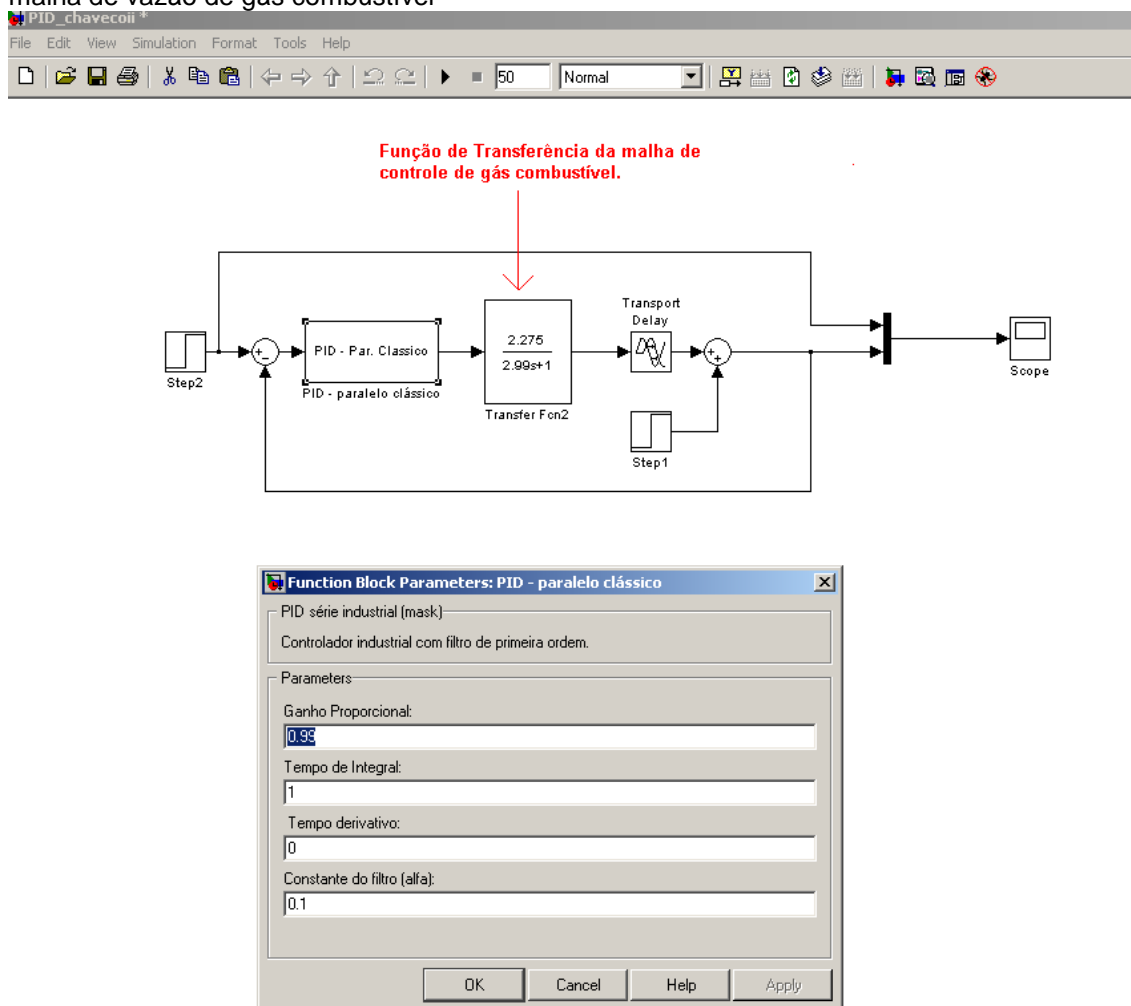
Figura 4-2 – Identificação da função de transferência do processo, método Ziegler Nichols, malha aberta.



Fonte: O autor.

O processo de identificação foi aplicado na malha de vazão de gás, mantendo-se as mesmas proporções em relação ao degrau unitário. Na figura 4-3 é possível observar o resultado obtido, após a introdução do distúrbio.

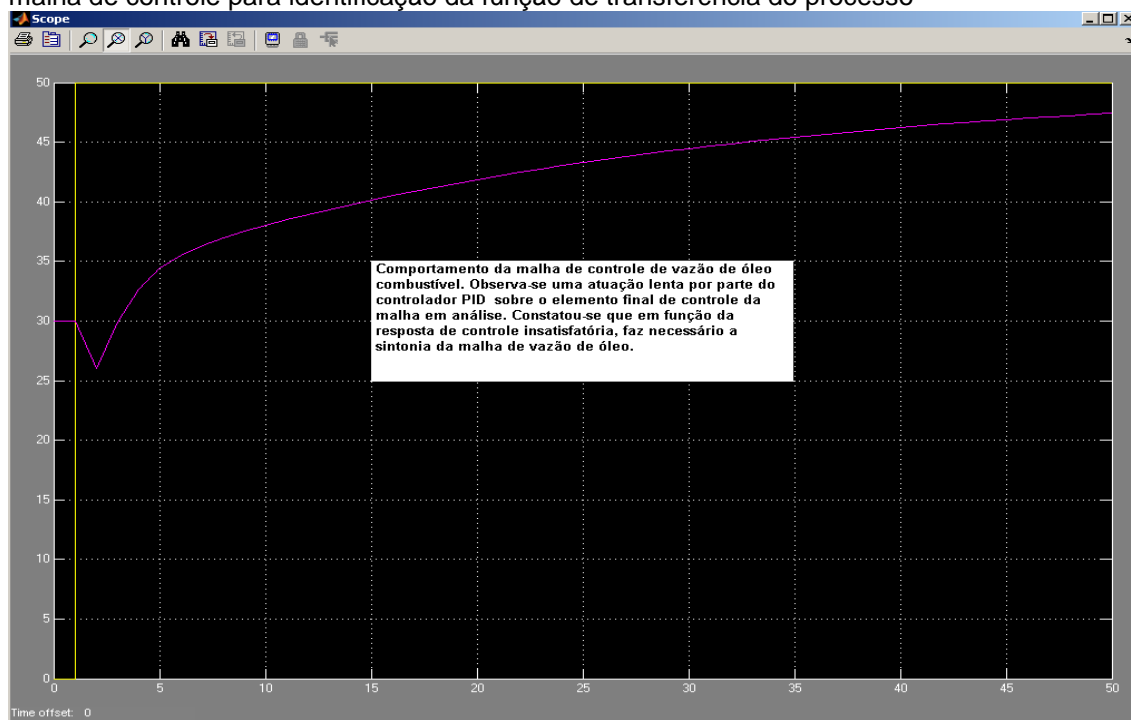
Figura 4-3 – Processo de identificação com malha de vazão de gás combustível. Aplicando degrau na malha de vazão de gás combustível



Fonte: O autor.

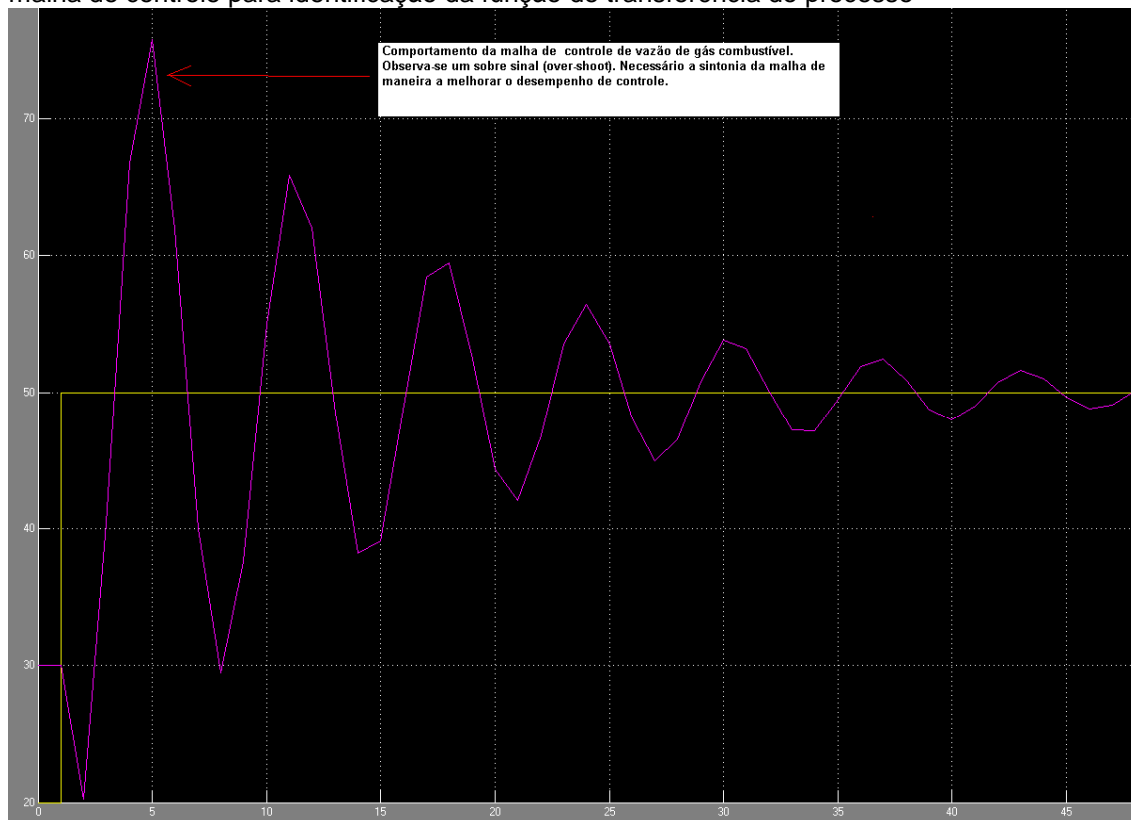
Ainda sobre o comportamento da malha de controle de vazão de óleo e gás observou-se um comportamento instável dos elementos finais de controle, em relação à curva de resposto dos mesmos. No capítulo 5 faremos as devidas considerações a respeito da resposta dos elementos finais de controle. Na figura 4-4 é mostrado a resposta da válvula de controle de vazão de óleo e na figura 4-5 a resposta da válvula de controle de gás de processo.

Figura 4-4 – Resposta da válvula de controle de vazão de gás em relação ao estímulo aplicado na malha de controle para identificação da função de transferência do processo



Fonte: O autor.

Figura 4-5 – Resposta da válvula de controle de vazão de gás em relação ao estímulo aplicado na malha de controle para identificação da função de transferência do processo

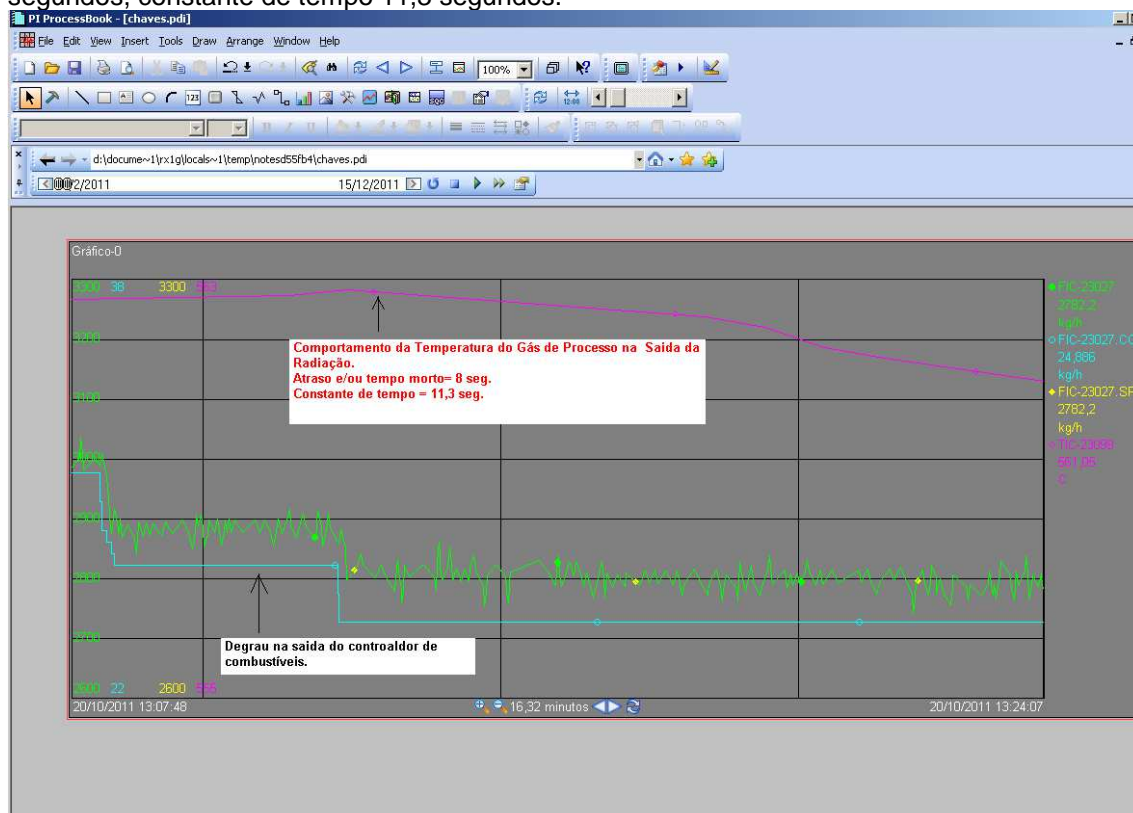


Fonte: O autor.



Em ambas as situações do processo de identificação, ou seja, estímulo nas malhas de vazão de gás e óleo combustível, a constante de tempo manteve próximo nos dois casos. Na figura 4-6 é mostrado o gráfico de temperatura de saída de gás de processo. Este gráfico foi extraído do sistema P&I, porem com o modo de compreensão desabilitado, ou seja, mantendo os valores dos dados obtidos de maneira fiel aos resultados dos testes.

Figura 4-6 – Resposta da temperatura do gás de processo na saída do forno, tempo morto de 8 segundos, constante de tempo 11,3 segundos.



Fonte: O autor.

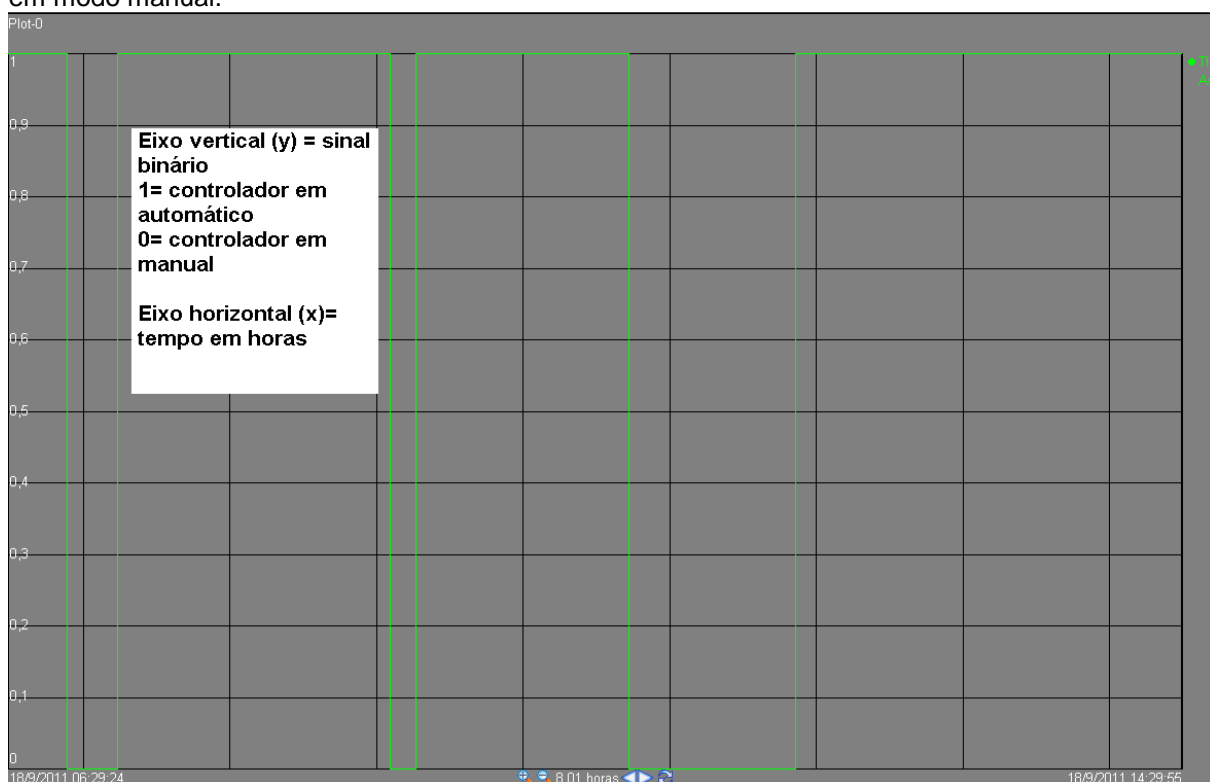
É importante destacar que antes da realização do procedimento de identificação da função de transferência, procurou-se planejar a intervenção em uma condição de processo que corresponde à faixa de operação do Forno nas condições de projeto, ou seja, objetivando não comprometer os resultados obtidos.

Foram mantidas as condições de processo de maneira a não produzir perturbações oriundas da mudança: vazão do produto, qualidade da carga em relação às condições de projeto construtivo do forno, temperatura de entrada, poder calorífico do combustível, retirada de operação de queimadores e temperatura do ar de combustão. Em particular cabe destacar que os queimadores possuem restrições

quanto a sua curva de operação, ou seja, uma variação na pressão e vazão de óleo combustível pode comprometer a qualidade e desempenho do processo de combustão (CAMPOS; TEIXEIRA, 2007). Esta afirmação deve ser considerada no projeto de estratégias de controle regulatório de combustão.

Alem de atender a meta de desempenho de eficiência energética o controle regulatório deveria contribuir efetivamente com as condições ambientais de emissão de poluentes para a atmosfera. A variabilidade apresentada pelo controle regulatório de combustão através das malhas de vazão de combustíveis durante a presença de distúrbios de processo de acordo com os gráficos apresentados retrata o comprometimento negativo dos indicadores econômicos e ambientais. Observado que o controlador de temperatura é mantido boa parte do período de operação na condição manual como poderá ser evidenciado através do gráfico da figura 4-7.

Figura 4-7 – Modo de operação do controlador de temperatura do gás de processo, período longos em modo manual.



Fonte: O autor.

## 4.5 CONSIDERAÇÕES

O Forno é um equipamento que desempenha a função de complementação de energia térmica para carga (gás de processo). Em determinadas condições e/ou aspectos relacionados com o processo, o Forno pode operar como reator, viabilizando as reações de <sup>32</sup>craqueamento catalítico (CAMPOS; TEIXEIRA, 2007).

Trata-se de equipamento imprescindível para o fornecimento de calor (energia térmica), de modo a promover elevação de temperatura das diversas correntes de carga para os respectivos reatores, trocador de calor, etc. Em função da demanda térmica do processo, o forno deve manter o suprimento de energia térmica durante todo o período de operação das unidades de refino. Os eventos relacionados com paradas não programadas (interrupção de operação da planta) e/ou perda parcial de carga térmica do Forno, compromete o resultado dos indicadores econômicos e ambientais, ou seja, afeta toda a cadeia produtiva do processamento de petróleo. Desta maneira a eficiência energética do Forno representa um indicador de grande importância, pois se trata de um referencial de desempenho operacional do equipamento.

O processo de identificação do modelo do Forno utilizando método Ziegler, Nichols e Rochester (1942), mostrou-se aderente ao propósito, porem, considera-se com uma dificuldade as restrições operacionais quanto à periodicidade (repetição) do método de identificação.

Observou-se durante o período de teste do Forno, em determinados intervalos de tempo, uma variação significativa na temperatura do gás de processo (saída do Forno). A instabilidade da temperatura do gás de processo acarreta problemas na produção derivados, obstrução interna dos tubos da radiação e convecção, formação de coque nas regiões de baixa velocidade do gás de processo, diminuindo o tempo de campanha do Forno e dos equipamentos interligados e/ou conectados ao mesmo. Procurou-se identificar pontos relevantes de melhorias nos periféricos do Forno, os quais serão tratados no capítulo sexto. No próximo capítulo

---

<sup>32</sup> Craqueamento, termo originado do termo inglês *cracking*, rompimento, fratura, quebra, divisão. É a denominação de vários processos químicos (indústria) pelos quais moléculas orgânicas complexas como querogênios ou hidrocarbonetos são quebradas em moléculas mais simples, por exemplo, hidrocarbonetos leves. O craqueamento catalítico corrige o déficit da produção de gasolina e GLP, suplementando a diferença entre a quantidade obtida diretamente do petróleo. O processo ocorre pela quebra de ligações carbono-carbono pela ação de calor e/ou catalisador. O craqueamento catalítico (CC) é um processo comumente usado, em refinaria de petróleo (SOARES et al., 2004).

será feita a análise dos resultados bem como a proposta de desenvolvimento de um novo controle regulatório para a malha de controle do processo de combustão.

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O objetivo principal deste capítulo é proceder na análise dos resultados obtidos em relação aos procedimentos de avaliação da eficiência energética do Forno Petroquímica, em relação ao seu desempenho do processo de controle térmico, desempenhado pelos sistemas de controle. É parte constituinte deste capítulo, propor o desenvolvimento de nova estratégia de controle com o objetivo de promover a melhoria de desempenho do controle da eficiência energética do Forno.

É pertinente destacar que em todo período de observação do comportamento das malhas de controle de combustão (carga térmica) do Forno, procurou-se identificar o desempenho dos dispositivos de campo (válvulas, transmissores, fim de curso, inversor de frequência, maçarico, analisador de gás) de maneira a produzir informações consistentes propiciando a análise e identificação de prováveis contribuintes para o não cumprimento das metas de eficiência energética (85%).

### 5.1 DESEMPENHO DA MALHA DE TEMPERATURA DO FORNO

Em relação a malha de controle regulatório de temperatura do gás de processo, observou-se uma tendência em manter-se o controlador mestre, na condição manual (modo manual). Observou-se que em determinadas condições de processo, ou seja, operação com carga abaixo da nominal (gás processo), o controle mantinha-se instável. Uma diminuição da carga para o reator representa redução da produção de gás de combustível entre outros derivados. Com a vazão de gás de processo abaixo da nominal, em função da redução da carga abaixo da nominal, a malha de controle de vazão de gás combustível para o forno é afetada, em imediato.

A estratégia de seleção de carga térmica (óleo e gás combustível) prioriza a maximização do consumo do gás combustível. Na estratégia de controle de vazão de óleo e gás, é considerada como restrição de consumo à manutenção da pressão de gás combustível no ramal principal. A pressão de gás combustível no ramal principal deverá ser mantida em torno de 5 Bar. A diminuição da produção de gás processo afeta diretamente a produção de óleo e gás combustível, e consequentemente promovendo a instabilidade das malhas de controle de vazão de vazão e pressão de combustíveis. Este efeito em cascata (ressonância) obriga o operador a mudar a condição de controle em relação à seleção de combustíveis.

A priori o operador muda o modo de operação das malhas de controle de combustíveis (óleo e gás) de automático para manual, e posteriormente a este comando, aumenta a vazão de óleo e diminui a pressão do ramal de gás combustível (controlador de vazão de gás combustível). Esta medida visa restabelecer a estabilidade térmica do Forno para a nova condição de processo, porem este distúrbio em relação à variação de carga contribui para:

5.0 redução da carga térmica do forno;

5.1 elevação da emissão de poluentes para atmosfera;

5.2 aumento do consumo de combustíveis e perda de energia térmica;

5.3 redução da eficiência energética do Forno

5.4 diminuição significativa do ciclo de vida útil dos feixes de tubos da radiação e convecção;

5.5 produção de coque e conseqüentemente redução da espessura das paredes internas dos feixes;

5.6 elevação da perda de carga entre entrada e saída do forno, provocada pela sujidade dos feixes de tubos, e aumento do consumo de combustíveis;

5.7 redução do tempo de operação do Forno em função da degradação dos feixes de tubos em decorrência do depósito de fuligem sobre a superfície externa dos tubos da radiação, provocando uma elevação de temperatura superior a de projeto;

5.8 fadiga operacional, malhas de controle na condição manual durante o período transitório e em determinadas circunstancias este distúrbio de carga é prolongado e conseqüentemente demandando atenção redobrada dos operadores de sala de controle e campo;

Em relação a malha de controle de vazão de ar, observou-se a necessidade de rever os parâmetros de controle em relação ao sobre sinal quando da

necessidade de atuação para a correção do excesso de ar para combustão. O elemento final de controle na malha de controle de vazão de ar é realizado por um motor conjugado com um variador de velocidade. O sinal de controle para alteração da velocidade do motor do soprador de ar para combustão é proveniente de um controlador do SDCD (Sistema Digital de Controle Distribuído). Trata-se de uma malha de controle fechada onde o elemento primário é um analisador de concentração de oxigênio, instalado na saída dos gases provenientes do processo de combustão. O controle da pressão da câmara de combustão é realizado através de um controle regulatório de pressão diferencial. Este controle atua sobre um damper interligado a chaminé. Na figura 5-0 é mostrado os elementos finais de controle (damper e motor do soprador de ar de combustão), é possível observar que se trata de equipamentos de grande porte, onde a variabilidade no controle, representa um distúrbio significativo para o processo em razão da massa e energia controlada.

Este controle tem como propósito manter uma pressão constante na fornalha de maneira a propiciar uma chama estável (não turbulenta). A chama turbulenta atinge os tubos da radiação, provocando o diminuindo ao ciclo de vida do feixe de tubos, em função da temperatura incidente estar acima das condições de projeto.

De modo a propiciar um desempenho satisfatório no controle de vazão de ar e pressão de gás de combustão na secção de radiação e convecção é pertinente adotar as seguintes ações:

Especificar analisador de  $O_2$  e  $Co_2$  (conjugado), de maneira a propiciar a medição efetiva das concentrações dos componentes da reação de oxidação (produção de calor chama). O analisador conjugado propiciará um controle efetivo da qualidade da combustão, ou seja, na estratégia regulatória do controle de temperatura do gás de processo, propiciara implementar função objetiva em relação a emissões atmosférica (atendimento de requisitos legais).

O controle de pressão na fornalha esta relacionado com um transmissor de pressão absoluto (Kpa), porem a tomada de impulso (conexão do transmissor ao processo) esta instalada em local onde a probabilidade de obstrução e relativamente alta. Outro aspecto relacionado com transmissor de pressão da fornalha é em decorrência do seu modo de falha por obstrução da tomada, podendo induzir na malha de controle de pressão na fornalha, uma indicação incorreta e produzir uma instabilidade na chama. A câmara de combustão possui sistema de circuito de vídeo,

o qual propicia a visualização do pacote de chama e cada queimador, contudo, o propósito deste equipamento é fornecer ao operador uma imagem do estado da reação de combustão. Em relação ao sistema de circuito de vídeo, este é considerado um sistema auxiliar de visualização (malha aberta) dependendo da ação do operador em caso de instabilidade relacionado com a chama e/ou combustão da fornalha (radiação).

Figura 5-0 – Elementos finais de controle, motor elétrico dumper.



Fonte: O autor.

A malha de controle de óleo combustível apresenta um comportamento instável em relação a demanda de carga térmica. Analisado a malha por meio da aplicação de variações de set-point, variações em ambos os sentidos, é observado um agarramento produzido pelo conjunto sede e obturador da válvula de controle. Fez parte desta análise a avaliação dos posicionadores das válvulas do circuito de controle de combustíveis. Apesar de ser equipada com posicionadores



tecnologicamente atualizados (inteligente) a configuração da curva de atuação (linear, exponencial, parabólica, etc.) não esta adequada em relação modelo da função de transferência do processo, criando um descompasso entre ação e reação (entrada linear e saída exponencial, não linear).

Neste tópico faz necessário reconfigurar os posicionadores das malhas de controle regulatório do circuito de combustão, de acordo com as características da variável controlada e modelo dinâmico do Forno. Promover uma reavaliação dos posicionadores instalados em relação ao desempenho da resposta do elemento final de controle. Cabe destacar que através de avaliação preliminar, identificou-se um conjunto de válvulas de controle com problemas de instabilidade decorrentes de posicionadores inadequados para o tipo de elemento final de controle e/ou configurados equivocadamente.

Ainda sobre a malha de óleo combustível, identificado uma segunda fonte de introdução de perturbação no sistema de combustão. A vazão de óleo para os maçaricos dos queimadores (linha de vazão de óleo) é alimentada através de um conjunto de bombas de engrenagens. O óleo combustível para alimentação dos maçaricos do queimador, flui através de um trecho de linha aproximadamente 150 metros de comprimento. Na descarga das bombas de óleo é constituída por filtros de retenção de particulados (material em suspensão), o qual poderia provocar uma obstrução nos maçaricos e consequentemente produzir uma instabilidade no processo de combustão e diminuição de rendimento térmico do Forno. Porém, quando o filtro perde a sua capacidade de filtragem (clico de filtragem) a pressão no trecho de linha diminui significativamente, comprometendo o controle de vazão de óleo e carga térmica. Existe uma rotina de verificação diária da pressão diferencial do filtro, porém este procedimento depende da ação do operador que em determinados momentos podem ocorrer superposição de atividades emergências e/ou julgadas mais importantes.

A sugestão para a mitigação desta fonte de distúrbio para a malha de controle de carga térmica para o Forno, é utilizar um tanque próximo ao forno (20 metros de distancia) como pulmão do circuito de óleo. Trata-se de um tanque de óleo diesel (desativado) em excelente esta em relação às características construtivas o qual poderá ser utilizado para este objetivo, diminuindo significativamente a perda de carga provocada pela redução do trecho de linha e principalmente pela obstrução de filtros etc., pois com o sistema próximo ao forno a característica do sistema de

bombeamento poderá ser modificada em razão da nova configuração e pressão em entre fonte de suprimento e queimadores (bomba centrífuga). Outro aspecto relevante em relação a esta sugestão de melhoria é decorrente da facilidade do operador do forno estar mais próximo ao sistema de suprimento de óleo com isto possibilitar um acompanhamento efetivo das atividades de campo.

O custo relativo a implantação das modificações sugeridas é atrativo uma vez que o número de distúrbios provocados e/ou relacionados com o circuito de óleo é elevado, ou seja, cerca de um evento a cada três meses (de acordo com registros de relatórios de turno) representando um ganho para o atingimento da meta de eficiência energética (85%).

A título de informativo, segundo Souza (2008) a cada 1% de elevação do rendimento térmico do Forno, representa um ganho econômico de aproximadamente meio milhão de dólares ao ano. No sistema Petrobras existe em torno de trezentos fornos, com capacidade térmica superior ou igual ao objeto de estudo deste trabalho (50MW). A reprodução das adequações do sistema de controle de combustão proposta neste capítulo em outras áreas do sistema Petrobras, representará um ganho econômico de setenta e cinco milhões de dólares ao ano meio e principalmente a diminuição significativa de emissões de poluentes para a atmosfera.

## 5.2 CONTROLADOR DIFUSO PID ADAPTATIVO PARA SISTEMA TÉRMICO

A proposta para melhoria da eficiência energética do Forno em função do comportamento regulatório do sistema de controle térmico seria a aplicação de um controlador Fuzzy PID Adaptativo. Esta proposta considerou as observações em relação as diversas fontes de distúrbios, não são consideradas na estratégia de controle do projeto original do sistema de controle de carga térmica do Forno.

A estratégia de controle responsável pela manutenção da temperatura do gás de processo não tem capacidade computacional para adaptarem-se as variações das características e comportamento dinâmico do forno em razão de atuar somente quando há ocorrência de desvios (erro).

Aspectos relativos aos distúrbios de carga são caracterizados por outros fatores tais: sujidade dos maçaricos e tubos de radiação e convecção, os quais descaracterizam a função de transferência e/ou modelo do forno. Nestas condições

os parâmetros das constantes PID perdem o efeito, introduzindo instabilidade no processo. Outro aspecto relevante em relação à dinâmica do processo, isto é, por tratar-se de um sistema de controle de temperatura e em função da grande inércia térmica exige um ganho adaptativo, pois não se trata de um controle de primeira ordem, mas de segunda ordem (CAMPOS; SAITO, 2004).

Quanto à proposta de solução para o controle de eficiência energética do Forno, cabe ponderar que a maioria dos artigos que retratam soluções de controle adaptativo com a utilização de algoritmos difuso (Controlador Fuzzy), é implementada em Controlador Lógico Programável (CLP e/ou PLC). A proposta deste trabalho é aplicar controlador lógico programável em plataforma de hardware de SDCD (Sistema Digital de Controle Distribuído) ou em servidor dedicado (controle avançado) em rede de automação.

Com relação ao desenvolvimento de um controlador baseado em lógica Difusa (Sistema Fuzzy), aplicado no SDCD e/ou Servidor Computacional, é uma solução diferente em relação aos trabalhos apresentados nesta área. A grande maioria dos artigos referenciados no capítulo terceiro são relacionados com o controle regulatório de combustão de Fornos e Caldeiras, com o desenvolvimento do controlador Fuzzy PID em CLP.

A razão para adoção de solução diferenciada é em virtude da vulnerabilidade do processo em razão de eventuais falhas do controlador lógico programável (CLP), ou seja, na perda parcial ou total das funções do equipamento (CLP) o controle regulatório e as funções de segurança (intertravamento, camada de proteção) estarão comprometidos.

A norma N-2595 determina que sistemas instrumentados de segurança de Fornos e Caldeiras, sejam aplicados em equipamentos com a finalidade única de proteção ao processo (PES), não devendo ser compartilhado com sistema de controle, sobre o risco de introduzir vulnerabilidades catastróficas a pessoas e processos.

Fez parte da proposta do desenvolvimento do “Controlador Difuso PID Adaptativo para Sistemas Térmicos” a introdução de filtros de 1º ordem de maneira desenvolver uma camada de caracterização de distúrbios provocados pela variação da função de transferência do processo e/ou relativos aos dispositivos de campo.

Ainda sobre a seleção da lógica nebulosa para solução dos problemas relativos desempenho e eficiência energética em sistema de combustão, esta

apresenta a função de pertinência próxima a sensibilidade do conhecimento tácito (operador), ou seja, é possível adaptar e/ou traduzir o aprendizado sobre o processo em métricas lingüísticas (CAMPOS; SAITO, 2004). Outro aspecto importante sobre o controlador Fuzzy e que o mesmo não utiliza o modelo e/ou função de transferência do processo em sua estrutura funcional.

Em relação aos controladores MPC e/ou DMC, seria uma opção interessante sobre os aspectos de facilidade de configuração, pois alguns dos maiores fabricantes de SDCD e/ou DCS (Sistema Digital de Controle), disponibilizam na biblioteca de blocos funcionais os algoritmos da Função de predição (MPC, DMC).

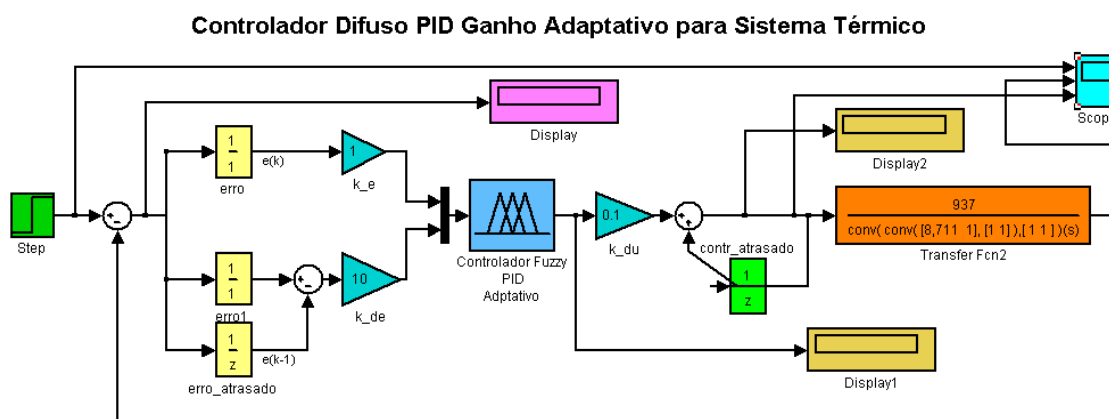
Porem, a grande maioria dos sistemas regulatórios de fornos petroquímicos e caldeiras instaladas nas refinarias, são controlados através de equipamentos (SDCD) que não dispõem de blocos e/ou bibliotecas funcionais relativos ao controlador preditivo MPC. A mudança desta plataforma motivada pela introdução do controle preditivo e/ou Fuzzy, implicaria em grandes investimentos o qual não seria facilmente justificável (projeto, aquisição, parada de produção para introdução de novo sistema, comissionamento, etc.). Talvez esta seja uma das motivações e/ou razões para a grande maioria das soluções apresentadas no capítulo terceiro, serem desenvolvidas em CLP.

Neste trabalho oferece uma terceira opção que é o desenvolvimento em ambiente computacional Plant Information (Servidor P&I). A solução tem os seguintes pontos favoráveis: não é necessário substituir os sistema de controle atual (SDCD e/ou DCS), pode ser incorporada a sistemas de controle PID clássico (4 a 20 mA), grande parte do investimento é intelectual, solução de hardware e software de fácil aquisição no mercado com diversos fabricantes (investimento aproximado para o Forno, U\$ 10.000,00), facilidade de manutenção e introdução de novas regras de inferência, algoritmo de controle não requer hardware com configurações especiais e/ou específicas em relação aos controladores preditivos, a grande maioria das refinarias dispõem de servidor P&I.

O controlador proposto foi projetado a partir da análise do comportamento dinâmico e interações das malhas de controle regulatório do processo de combustão.

A figura 5-1 é mostra o controlador PID Ganho Adaptativo para sistema térmico do Forno.

Figura 5-1 – Controlador Difuso Adaptativo para Sistema Térmico (CDAST)



Fonte: O autor.

Os procedimentos a ser adotado à priori para o projeto é a identificação das variáveis linguística, para parametrização da base de conhecimento, a qual consiste na conversão dos valores números em pesos. Na tabela 5-0 é disponibilizado as regras e funções de pertinência que deverão ser configuradas no controlador Difuso PID Adaptativo, durante o processo de desenvolvimento da estratégia.

Tabela 5-0 Regras do Motor de Inferência

Temperatura °C	Caracterização Peso	Ação do Controlador Saída
570	Muito alta Crítica	Diminuir combustíveis independentes do excesso de ar
565	Alta não crítica	Diminuir combustíveis controlando excesso de ar
558	Baixa crítica	Aumentar combustíveis controlando excesso de ar

Fonte: O autor.

Uma das vantagens do controlador Difuso é em relação a possibilidade de elaborar estratégias de controle não-linear de uma forma eficiente (CAMPOS; SAITO 2004).

O mecanismo de Fuzzyficação e Defuzzyficação e demais detalhes do controlador Fuzzy, não são detalhados neste tópico, pois já forma tratados no capítulo terceiro.

### 5.3 CONSIDERAÇÕES

Este capítulo tratou da análise de resultados de desempenho do sistema de controle do Forno. Foram abordados elementos da camada de controle e sistema periféricos considerados críticos tais como: sistema de alimentação de óleo, dumper, redundância de transmissores, comportamento de instabilidade dos elementos finais de controle, entre outros. Contudo cabe ponderar que o processo de identificação merece um estudo detalhado objetivando uma maior aproximação do modelo da dinâmica do processo (FORNO). Seria extremamente pertinente adotar uma abordagem de identificação através de metodologia adotando a rede neural como ferramenta de validação. É matéria relevante o requisitos de desenvolvimento sustentável para o sucesso do modelo de gestão do negocio, onde a automação poderá contribuir com melhoria da eficiência energética através do desenvolvimento de soluções na camada de software (algoritmos computacionais).

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A automação de processos industriais representa uma solução importante para os problemas relacionados com o controle de plantas em todo o seguimento da cadeia produtiva. Além de propiciar a diminuição da exposição do Homem em operações de risco e insalubres, assegura uma produção continuada e segura.

No entanto para que o comportamento esperado em relação as variáveis controladas estejam em concordância com o projetado, o projetista de automação e controle deverá deter conhecimentos específicos em relação as técnicas e metodologias de estratégias de controle de processos e sistemas. No entanto existem numerosas soluções equivocadas relacionadas com a aplicação das estratégias de controle, em razão do desconhecimento das premissas e técnicas aplicáveis. É neste contexto que academia poderá contribuir no campo da formação e pesquisa na área de controle, objetivando desenvolver novas metodologias e técnicas relacionadas ao controle regulatório de processos indústrias.

Este trabalho apresenta oportunidades de continuidade futuras na área de pesquisa, tais como: desenvolvimento de Algoritmo de identificação e/ou aplicação de técnicas de obtenção de modelo dinâmico de processo térmico, através de algoritmos Neurais. Esta oportunidade é fruto da constatação da dificuldade de obtenção da função de transferência do processo através das técnicas consagradas porem não customizadas para processos térmicos.

Outra oportunidade para trabalhos futuros é o desenvolvimento de estratégia de controle que possibilite a inferência através de outros dispositivos analíticos (equipamentos cromatográficos de processo) em relação ao comportamento futuro (previsibilidade) de uma determinada carga de processo (fluxo de gás, petróleo, entre outros), atuando em diversas outras malhas de controle de relevância para o processo. Acredita-se ter contribuído com o meio acadêmico em relação as oportunidades de trabalhos futuros relacionados com sistemas térmicos, uma área pouco explorada, porem extremamente complexa.

Avaliação em relação aos resultados obtidos para atividade produtiva, evidencia pela consciência da necessidade de investimentos em função da rentabilidade do retorno de capital e em primeira instancia, a sustentabilidade ambiental, fator decisivo para perpetuação da atividade econômica e humana. Por fim é mérito do corpo docente, os resultados obtidos em função dos conhecimentos

e habilidades adquiridas ao longo do período do curso. Não há a menor dúvida de que a academia representa a fonte de sabedoria, onde foi possível constatar que através de métodos e técnicas científicas é possível atingir resultados extremamente satisfatórios para a solução de problemas complexos relacionados com o controle regulatório.



## REFERÊNCIAS

ABONYI, J. et al. Identification and control of nonlinear systems using fuzzy hammerstein models. **Industrial Engineering Chemical Research**, [S.l.], v. 39, no. 11, p. 4302-4314, 2000.

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Banco de informações de geração**: BIG. Brasília, 2003. Disponível em: <www.aneel.gov.br/15.htm>. Acesso em: 05 dez.2011.

AGUIRRE, L. A.; COELHO, M. C. S.; CORRÊA, M. V. On the interpretation and practice of dynamical differences between Hammerstein and Wiener models. **IEE Proceedings: control theory applications**, [S.l.], v. 152, no. 4, p. 349-356, 2005.

AIRY, George Biddell; AIRY, Wilfrid. **The autobiography of Sir George Biddell Air**. [S.l.]: [s.n.], 1896.

ALMEIDA, O. D. M.; COELHO, A. A. R. Controladores PID auto-ajustavel e nebuloso: aspectos de projeto, sintonia e aplicação pratica. In: SBAI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, 4., 1999, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SBAI, 1999.

AMARAL, J. F. M.; AMARAL, J. L. M. Controle de temperatura baseado em lógica nebulosa utilizando controladores programáveis. In: SINA'98 SEMINÁRIO DE INSTRUMENTAÇÃO E AUTOMAÇÃO, 1998, [S.l.]. **Anais...** [S.l.]: Inst. Brasileiro do Petróleo, 1998. IBP33298

AMARAL, José Franco M. do. **Síntese de sistemas fuzzy por computação evolucionária**. Tese (Doutorado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

ANTUNES, A. J. B.; PEREIRA, J. A. F. R.; FILETI, A. M. F. Fuzzy control of a PMMA batch reactor: development and experimental testing. **Computers & Chemical Engineering**, [S.l.], v. 30, no. 2, p. 268-276, 2005.

ARABSHAHI, Payman et al. Pointer adaptation and pruning of min-max fuzzy inference and estimation. [S.l.]: [s.n.], 1998.

ARAUJO, L. A. **Manual de siderurgia**: Produção. v. 1: São Paulo: Arte & Ciência/CSN, CST, 1997.

ARBEX, R. T. Controle fuzzy: conceitos e aplicações. **INTEC, Instrumentação e Controle de Processos**, [S.l.], p.18-30, jun, 1994.

ÅSTRÖM, K. J., HÄGGLUND, T. Revisiting the Ziegler-Nichols step response method for PID control. **Journal of Process Control**, [S.l.], v. 14, 2004.

ÅSTRÖM, K. J.; WITTENMARK, B. **Computer-controlled systems: theory and design**. 3. ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 1997.

BACK, T. **Evolutionary algorithms in theory and practice**: evolution strategies, evolutionary programming, genetic algorithms. [S.l.]: Oxford University Press, 1997.

BAUKAL, Charles E; SCHWARTZ, Robert E. **The john zink combustion handbook**. [S.l.]: CRC Press, 2001. ISBN: 978-0-8493-2337-9.

BEGA, E. A. et al. **Instrumentação industrial**: Instituto Brasileiro de Petróleo (IBP). Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

BOFF, Leonardo. **Ética do humano**: compaixão pela terra. Petrópolis: Vozes Petrópolis, 2008.

BRADY, J. E.; HUMISTON, G. E. **Química geral**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1986.

BRASIL. Decreto n. 99.274, de 6 de junho de 1990. Regulamenta a Lei nº 6.902, de 27 de abril de 1981, e a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, que dispõem, respectivamente sobre a criação de Estações Ecológicas e Áreas de Proteção Ambiental e sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 7 jun. 1990.

BRASIL. Lei no 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2 set. 1981.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Avaliação da eficiência energética na indústria e nas residências no horizonte decenal (2010-2019)**. Rio de Janeiro, jul. 2010,

BRASIL, Nilo Índio do. **Fornos**. Rio de Janeiro: Petrobras, 1996.

CAMACHO, E. F.; BORDONS, C. **Model predictive control**. London: Springer Verlag, 2004.

CAMARGO, Paulo R. Costa. **Processos de Refino**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2010, p. 10-12. Apostila da Universidade Federal do Rio de Janeiro,

CAMPOS, Mario Cesar M. Massa de; TEIXEIRA, Hebert C. G. **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. Rio de Janeiro: Petrobras, 2007.

CAMPOS, M. M.; SAITO, K. **Sistemas inteligentes em controle e automação de processos**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2004. 235p.

CAPELLI, A. **Automação industrial**: controle do movimento e processos contínuos. São Paulo: Editora Érica, 2007.

CARDOSO, L. C. **Petróleo**: do poço ao posto. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2005.

CARELLI, ALAIN C. **Avaliação de desempenho estocástico e determinístico de controladores PID e preditivo**: aplicação a um reator de hidrotratamento. 2008. 111 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel)– Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

CHANG, Raymond **Química**. 5. ed. Lisboa, Portugal: Mc Graw Hill, 1998.

CHAUPRADE, A. États-Unis, Russie, Chine: Guerre pour le pétrole! **Histoire**, [S.l.], no. 279, p. 56-59, Sept. 2003.

CHAVES, Carlos Roberto et al. Análise da implementação comercial do controlador preditivo MPC. **Petro & Química**, São Paulo, n. 335, 2011.

\_\_\_\_\_. Apostila de instrumentação e controle do curso de formação de operadores do Sistema Petrobras. Rio de Janeiro: Petrobras, 2002.

CHEN, D.; SEBORG, D. E. PI/PID controller design based on direct synthesis and disturbance rejection. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Washington, v. 41, p. 4807-4822, 2002.

CHIOU, Y. C.; LAN, L. W. Genetic fuzzy logic controller: an iterative evolution algorithm with new encoding method. **Fuzzy Sets and Systems**, [S.l.], 2005.

CLARKE, D. W.; MOHTADI, C. **Properties of generalized predictive control**. [S.l.]: Automatica, 1989.

CLARKE, D. W.; ZHANG, L. Long-range predictive control using weighting-sequence models. **IEEE Proceedings Part D**, [S.l.], v. 134, no. 3, p. 187-195, 1987.

COELHO, L. S.; COELHO, A. A. R. Algoritmos evolutivos em identificação e controle de processos: uma visão integrada e perspectivas. **SBA Controle & Automação**, [S.l.], v. 10, n.1, jan./abr. 1999.

COELHO, Antonio A R. **Apostila identificação e controle adaptativo do Engenharia de Controle e Automação Industrial**. Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

CORDÓN, O.; HERRERA, F.; VILLAR, P. Generating the knowledge base of a fuzzy rule-based system by the genetic learning of the data base. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, [S.l.], v. 9, 2001.

COX, Earl. **The fuzzy systems handbook**: a practitioner's guide to building, using, and maintaining fuzzy systems. [S.l.]: [s.n.], 1994. ISBN 0-12-194270-8.

CUTLER, C. R.; RAMAKER, B. L. Dynamic matrix control: a computer control algorithm. In: JOINT AUTOMATIC CONTROL CONFERENCE, 1980, San Francisco, CA. **Proceedings...** San Francisco: [s.n.], 1980.

DARWIN, Charles Robert. **The descent of man, and selection in relation to sex**. [S.l.]: Royal Society, 1871.

DORF, RICHARD C.; BISHOP, ROBERT H. **Modern control systems**. 9th ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2001.

EMERSON PROCESS MANAGEMENT. **DeltaV book's online**. Sorocaba, 2010. Disponível em: <<http://www.emersonprocess.com.br>>. Acesso em: 4 mar. 2011.

FADAEI, A.; SALAHSHOOR, K. Design and implementation of a new fuzzy. In: OLIVEIRA JUNIOR, Hime Aguiar. **Lógica difusa: aspectos práticos e aplicações**. Rio de Janeiro: Interciência, 1999. 192 p.

FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. **Novo dicionário da língua portuguesa**. 3 ed. Curitiba: Positivo, 2004.

GALZINA, V.; MAJDANDŽIĆ, N.; ŠARIĆ, T. Revitalizacija upravljačkog sustava kotlovnice Sladorana d.d. Županja: elaborate. **Mechanical Engineering Faculty**, Slavonski, Brod Croatia, 2008.

GARCIA, C. **Modelagem e simulação**. São Paulo: Editora da USP, 1997.

GARCIA, R. **Combustíveis e combustão industrial**. [S.l.]: Interciência, 2002.

GE, M.; CHIU, M. S.; WANG, Q. G. Robust PID controller design via LMI approach. **Journal of Process Control**, [S.l.], 2001.

GOLDBERG, D. **Genetic algorithms in search, optimization and machine learning**. [S.l.]: Addison-Wesley, 1989.

GOMIDE, Fernando A. C.; GUDWIN, Ricardo R.; TANSCHKEIT, Ricardo. **Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos fuzzy, lógica e aplicações**. 2010. v. 1. Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

GONZÁLEZ, A.; PÉREZ, R. A learning system of fuzzy control rules based on genetic algorithms. In: HERRERA, F.; VERDEGAY, J. **Genetic algorithms and soft computing**. [S.l.]: Physica-Verlag, 1996.

GUERRA, A.; COELHO, J.; LEITÃO, R. **Fenomenologia da combustão e extintores**. v. 7, 2. ed. Sintra: Escola Nacional de Bombeiros, 2006.

GUIMARÃES, J. F. Usar controle avançado é fácil e lucrativo. **Intech Brasil**, out. 2006;

\_\_\_\_\_. Aplicação de controle multivariável preditivo com otimização em unidade de grande porte. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE AUTOMAÇÃO SISTEMAS E INSTRUMENTAÇÃO (ISA), 2001, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ISA, 2001.

HAGER, G.; WELLEIN, G. **Introduction to high performance computing for scientists and engineers**. [S.l.]: Chapman and Hall, 2010.

HEDAR, A.; FUKUSHIMA, M. Tabu search directed by direct search methods for nonlinear global optimization. **European Journal of Operational Research**, [S.l.], v. 170, p. 329-349, 2006.

HIROTA, K. History of industrial applications of fuzzy logic in japan. In YEN, J.; LANGARI, R.; ZADEH, L. A. (editors). **Industrial applications of fuzzy logic and intelligent systems**. [S.l.]: IEEE Press, 1995. p. 43-54.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems**. Ann Arbor, MI: The University of Michigan Press, 1975.

HORDESKI, Michael F. **Dictionary of energy efficiency technologies**. Georgia: The Fairmont Press, 2005.

HOUGHTON, John. **Global warming: the complete briefing**. 3. ed. [S.l.]: Cambridge Press, 2004.

HUSSERL E. **A filosofia como ciência do rigor**. Coimbra: Atlântica, 1965.

KALID, Ricardo de Araújo. **Otimização de processos**: programa de engenharia industrial. Bahia: Escola Politécnica da UFBA, 2011.

KARTALOPOULOS, S. V. **Understanding neural networks and fuzzy logic**. [S.l.]: IEEE PRESS, 1996;

KAUFMANN, Arnold; GUPTA, Madan M. **Fuzzy mathematical models in engineering and management science**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B, 1988.

KELLING, Charles David Keeling. The influence of Mauna Loa observatory on the development of atmospheric co2 research. **Mauna Loa Observatory**, [S.l.], Sept. 1978.

KLARE, M.T. **Resource wars: the new landscape of global conflict**. New York: Metropolitan Books, 2001.

KINNEY, Thomas. Optimizing boiler operations through adaptive modeling of advanced process control, product: management, advanced applications, invensys operations management. **Magazine Newsletter**, [S.l.], 2012.

KOCAARSLAN, İlhan et al. A fuzzy PI Controller application in boilers of thermal power plants. In: ELECO'05 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING, 4., 2005, Bursa. **Proceedings...** Bursa: [s.n.], 2005.

KUPHALDT, Tony R. **Lessons in industrial instrumentation**. [S.l.]: [s.n.], 2008.

LAFRAIA, J. R. B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2011.

LÁZARO, W. Apostila Petrobras [de] processos de craqueamento. In: PETROBRAS. **Programa Trainees Petrobras**. Rio de Janeiro, 2003. p. 20-30.

LEWIS, F. L. **Applied optimal control and estimation**. [S.l.]: Prentice Hall, 1992.

LI, Han-Xiong; GATLAND, H. B. Convectional fuzzy control and its enhancement. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, [S.l.], v. 26, no. 5, p. 791-797, Oct. 1996.

LIANGHONG, N. et al. Design of PID, controller with incomplete derivation based on differential evolution algorithm. **Journal of Systems Engineering and Electronics**, [S.l.], 2008.

LIU, Jizhen; YUAN, Guili. The design for feed water system of boiler based on fuzzy immune smith control. **Journal of Computers**, [S.l.], v. 7, no. 1, p.278-283, Jan. 2012.

LORA, Electo Eduardo Silva; NASCIMENTO, Marco Antônio Rosa do. **Geração térmica: planejamento, projeto e operação**. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. v. 1.

MAITELLI, Andre L. et al. Implementação de controladores PID utilizando lógica fuzzy e instrumentação industrial. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, 7., 2005, São Luís. **Anais...** São Luís: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2005.

MALHOTRA Rahul; SODHI, Rajinder. Boiler flow control using PID and fuzzy logic controller. **IJCET**, [S.l.], v. 1, no. 6, p. 315-319, July 2011.

MARTIN, Greg. D.; TURPIN, Lee; CLINE, R. P. Estimating control function benefits. **Hydrocarbon Processing**, [S.l.], p. 68-73, June 1991.

MCINTOSH, A. R.; SHAH, S. L.; FISHER, D. G. Analysis and Tuning of Adaptive Generalized Predictive Control. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, [S.l.], 1991.

MINORSKY, N., The principles and practice of automatic control. **The Engineer**, [S.l.], 1937.

MINSKY, Marvin. **The society of mind**. Nova Iorque: Simon & Schuster, Touchstone Book UNB, 1986. 339 p.

MINTZBERG, H. Strategy: making in three modes. **California Management Review**, [S.l.], v. 16, n. 2, Winter, 1973.

MONTEIRO, Antonio José L. C. **Legislação ambiental**. São Paulo: Pinheiro Neto Advogados, 2007. Disponível em: <[http://www.pinheironeto.com.br/upload/tb\\_pinheironeto\\_livreto/pdf/070507111358a\\_mambiental\\_2007.pdf](http://www.pinheironeto.com.br/upload/tb_pinheironeto_livreto/pdf/070507111358a_mambiental_2007.pdf)>. Acesso em: 05 dez. 2011.

MORAES, C. C.; CASTRUCCI, P. L. **Engenharia de automação industrial**. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

MORARI, M.; Lee, J. H. Model predictive control: past, present and future. **Computers and Chemical Engineering**, [S.l.], v. 23, no. 4-5, p.667-682, 1999.

MORTIMER, E. F.; AMARAL, L. O. F. Quanto mais quente melhor: calor e temperatura no ensino de termoquímica. **Química Nova na Escola**, [S.l.], 1998.

MUKATI, K.; RASCH, M.; OGUNNAIKE, B. A. An alternative structure for next generation regulatory controllers: part 2: stability analysis, tuning rules. **Journal of Process Control**, [S.l.], 2008. In press.

MULLINGER, P.; JENKINS, B. **Industrial and process furnaces principles, design and operation**. Bucks: Elsevier, 2008.

NASCIMENTO, M. L. **Controle multivariável de colunas de destilação de petróleo**. 1994. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)–Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

NATALE, F. **Automação industrial**. São Paulo: Editora Érica, 2007.

NORTON, H. N. **Handbook of transducers for eletronic meansuring systems**. [S.l.]: Prentice- Hall, 1961.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 3. ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall, 1998.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 4. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2003.

OLBRING, Marcos; TALEBI, R. **Desenvolvimento, testes e comissionamento de um software baseado em fuzzy estruturada-sistema de controle fuzzy PID para controle de temperatura de fluxo**. 1998. Tese (Mestrado)–Universidade de Ciências Aplicadas, Siemens-Landis & Staefa, Cologne Germany, [S.l.], 1998 .

PADILHA, Paulo Cesar Carneiro. **Desenvolvimento de uma metodologia de sintonia de controladores “fuzzy” utilizando redes neurais aplicações em processos petroquímicos**. 2001. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Instituto Militar de Engenharia, [S.l.], 2001.

PALÚ, Fernando. **Controle preditivo de colunas de absorção com o método de controle por matriz dinâmica**. 2001. 152 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – UNICAMP, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo, 2001.

PEREY, Robert H.; GREEN, Don W. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 6th ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 1984.

PERRY, T. S. Lotfi A. Zadeh [biography]. **IEEE Spectrum**, [S.l.], v. 32, no. 6, pp. 32-35, June 1995.

PETROBRAS. **Manual de operação de fornos petroquímicos**: curso de formação de operadores. Rio de Janeiro, 1998. v.1. p. 10-30.

PID controller for networked control systems. **ISA Transactions**, [S.l.], 2008. In press.

PRÄSS, Alberto Ricardo. **Plasma, o quarto estado da matéria: física nuclear**. [S.l.]: Editora Gladkov, 2009.

QIN, S.J.; BADGWELL, T. A. An overview of nonlinear model predictive control applications. In: KANTOR, J. C.; GARCIA, C. E.; CARNAHAN, B. (org.), **Nonlinear model predictive control**. Basel: Birkhauser, 2000.

RAMASAMY, M.; SUNDARAMOORTHY, S. PID controller tuning for desired closed-loop responses for SISO systems using impulse response. **Computers & Chemical Engineering**, [S.l.], v. 32, no. 8, 2008, p. 1773-1788.

REYNOLDS, W. C.; PERKINS, H. C. **Engineering thermodynamics**. [S.l.]: McGraw Hill, 1977.

RIBEIRO, Marco A. **Resumo símbolos e identificação de instrumentação**. North Carolina, USA: Research Triangle Park, 2008. 27709.

RICHALET, J. Industrial applications of model based predictive control. **Automatica**, [S.l.], v. 29, n. 5, p. 1251-1274, 1993.

RICHALET, J. et al. Model predictive heuristic control: applications to industrial processes. **Automatica**, [S.l.], v. 14, p. 413-428, 1978.

RODRIGUES, J. CALEIA. **A geopolítica do petróleo**: anatomia dos conflitos: diplomacias, seguranças, soberanias. Lisboa: Atelier de Livros, 2000.

ROWE, D. M. **Thermoelectrics handbook**: macro to nano. [S.l.]: Taylor & Francis, 2006.

SAEZ, D.; CORTES, C. E.; NUNEZ, A. Hybrid adaptive control for the multivehicle dynamic pick-up and delivery problem based on genetic algorithm and fuzzy clustering. **Computers & Operation Researches**, [S.l.], v. 35, no. 11, p. 3412-3438, 2008.

SAMPAIO, Raimundo. **Curso de formação**: inspetor de equipamentos fornos. [S.l.]: [s.n.], 2008.

SANTOS, Edson M. **Simulador de manobras em tempo real com sistema de posicionamento dinâmico**. 2005. Tese (Doutorado)–Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.



SANTOS, Eli S. Controle preditivo não-linear para sistemas de Hammerstein. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)–Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A. **Process dynamic and control**. New York: John Wiley, 1989

SERFATY, Ricardo. Apostila escola de combustão: o papel da combustão na área de refino e petroquímica da Petrobras, CENPES, gerencia de equipamentos. Rio de Janeiro: PETROBRAS, 2007.

SHAW, I. S.; SIMÕES, M. G. **Controle e modelagem fuzzy**. São Paulo: Edgard Blucher, 1999.

SILVA, Gustavo Vitorino Monteiro da. Instrumentação industrial. 2. ed. [S.l.]: Escola Superior de Tecnologia de Setúbal, 2004.

SILVEIRA, P. R.; SANTOS, W. E. **Automação e controle discreto**. São Paulo: Editora Érica, 2007.

SOARES, Valerio C. D. et al. Diesel-like fuel obtained by pyrolysis of vegetable oils. **Journal of Analytical And Applied Pyrolysis**, [S.l.], v. 71, n. 2, p. 987-996, 2004.

SOUZA, Edson José Joaquim de. **Implantação de laboratório de combustão em escala industrial para avaliação de emissões e combustíveis**. 7. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2008. p. 2-3.

SOUZA JR, R.; ALMEIDA A, P. I. F. Design of a fuzzy system for the control of a biochemical reactor in fed-batch culture. **Process Biochemistry**, [S.l.], v. 37, p. 461-469, 2001.

SPANDRI, R. Controle avançado. In: PETROBRAS. **Programa de Trainees Petrobras [de] engenheiro de processamento júnior**. Rio de Janeiro, 2003.

SPANDRI, R. Sintonia de controladores regulatórios. **Boletim técnico da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 46, n. 314, p. 383-410, 2003,

TANENBAUM, A. S. **Organização estruturada de computadores**. 4. ed. [S.l.]: LTC, 2008.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. **Sensores Industriais**: fundamentos e aplicações. São Paulo: Editora Érica, 2007.

TOSTES, Anna Izabel J.; DUARTE-FIGUEIREDO, Fátima F. L. P; ZÁRATE, Luis E. Controle de admissão fuzzy baseado em limites dinâmicos de congestionamento para redes de celulares. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES E SISTEMAS DISTRIBUÍDOS, 29., 2010, [S.l.]. **Anais...** [S.l.]: [s.n.], 2010.

TRAORÉ, A. et al. Fuzzy control of dissolved oxygen in a sequencing batch reactor pilot plant. **Chemical Engineering Journal**, [S.I.], v. 111, no. 1, p. 13-19, 2008.

TRINDADE, Ronaldo S. Transmissores de 4 a 20 mA a dois fios. **Eletrônica.org**, [S.I.], 2006.

VALIGRA, L. MIT physicists create new form of matter. **MIT News**, [S.I.], 2010.

WAN, Eric A. **Control systems**: classical, neural, and fuzzy. [S.I.]: Oregon Graduate Institute, 1998. Lecture Notes.

WITTMANN, B. et al. POF-based interconnects for intracomputer applications. **IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics**, [S.I.], v. 5, no. 5, p. 1243–1248, Sep./Oct. 1999.

YAO, Xin; LIU, Young; LIN, Guangming. Evolutionary programming made faster. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, [S.I.], v. 3, no. 2, p. 82-102, July 1999.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, [S.I.], v. 8, 1965.

ZAMBRANO, D.; CAMACHO, E. F. Application of MPC with multiple objective for a solar refrigeration plant. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL APPLICATIONS, 2002, Glasgow. **Proceedings...** Glasgow: IEEE, 2002.

ZIEGLER, J G.; NICHOLS, N. B.; ROCHESTER, N. Y. Optimum settings for automatic controllers. **Transaction of American Society of Mechanical Engineers**, [S.I.], v. 42, no. 64, p. 759-768, 1942.

## **ANEXOS**

## **ANEXO A – Lista de Publicações**

### **1- Análise da Implementação Industrial de MPC em Ambientes Single-loop**

Autores: Carlos Roberto Chaves - PETROBRAS, Gideon Villar Leandro - DELT/UFPR, Gustavo Henrique da Costa Oliveira - DELT/UFPR, Edson José Joaquim de Souza - PETROBRAS, José Manoel Fernandes - DELT/UFPR Bloco: O - Otimização e controle avançado de processos Página: 1/1 - Total de Registros: 5 Dia: 17 de Maio - Terça-Feira Bloco: Otimização e controle avançado de processos Local: SALÃO GOYA 10h30min/11h00min IBP680\_11 Análise da Implementação Industrial de MPC em Ambientes Single-loop Bloco: O - Otimização e controle avançado de processos.

2- Artigo sobre MPC apresentado na ISA International USA 2011, Identification for Industrial Model Predictive Controllers - This article aims at evaluating the desempenho and adherence of the transfer function of an airflow process control, obtained by the mathematical modeling identification tool available in the model predictive controller (MPC) regarding the Ziegler-Nichols method. The purpose of this article relies on comparing results obtained between two identification methods. Carlos Roberto Chaves, Gustavo Oliveira, Gideon Villar Leonardo, José Manoel - Keywords: Controllers, Predictive Model.

## **ANEXO B – Artigo sobre MPC apresentado na VI Congresso Rio Automação 2011**

### **Copyright 2011, Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis – IBP**

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação no **VI Congresso Rio Automação**, realizado nos dias 16 e 17 de maio de 2011, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas na sinopse e no texto final submetido pelo(s) autor (es). O conteúdo do Trabalho Técnico, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor (es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais do **VI Congresso Rio Automação**.

---

### **Análise da implementação comercial do controlador preditivo MPC.**

Carlos Roberto Chaves

Gustavo Oliveira

Gideon Villar Leonardo

José Manoel

### **RESUMO**

Este artigo tem como objetivo a implementação do controle preditivo comercial, em substituição ao controlador PID. A proposta inicial foi a avaliação dos aspectos construtivos e de desempenho do controlador preditivo MPC. A avaliação de desempenho entre o controlador PID e MCP, se restringiu ao ambiente do sistema DeltaV. A escolha pelo sistema DeltaV, é por se tratar de sistema operativo, instalado em unidade de pesquisa, e principalmente, por não representar custo adicional para a implementação do controle preditivo. Durante o acompanhamento do desempenho do MPC, observou-se que mesmo sendo uma malha de controle SISO, o ganho relativo à diminuição da variabilidade foi significativo. Esta robustez da estratégia de

controle é oriundo na forma construtiva do controlador MPC, representado pelas regras e objetivas de controle, diante de um horizonte de predição. Mesmo aplicando em situações de modo SISO, o ganho em diminuição de variabilidade é representado no aumento de campanha das unidades produtivas, seguimento do petróleo.

## **ABSTRACT**

This article aims to be commercial implementation of predictive control, replacing the PID controller. The initial proposal was to assess the aspects of construction and performance of predictive control MPC. The assessment of performance between the PID controller and MCP was restricted to the DeltaV system environment. The selection by the DeltaV system, because it is operating system, installed at the research facility and most importantly, it does not represent additional cost to implement the predictive control. During the monitoring of performance of the MPC, it was observed that even with a SISO control loop, the gain will decrease the relative variability was significant. This robustness of the control strategy is derived in a constructive way the MPC controller, represented by the rules and objective of control, before a prediction horizon. Even in situations of applying SISO mode, the gain in reduction of variability is represented in the campaign increased its production units, monitoring of oil.

## **1 INTRODUÇÃO**

O controle preditivo baseado em modelo ("Model Predictive Control") é uma técnica de controle poderosa que está bem desenvolvida e consolidada nas últimas décadas. É um método de controle avançado de processo que tem sido utilizado em diversas aplicações, dentre elas a indústrias de processos, tais como: indústria química, petroquímica, papelreira, aeronáutica. A primeira aplicação do controle preditivo baseado em modelo relatada na literatura foi apresentada por Richalet no ano de 1978, denominada Controle Heurístico por Modelo Preditivo (MPHC). Aproximadamente na mesma época os engenheiros da Shell Cutler e Rademaker desenvolveram um controlador preditivo (MPC), ao qual deram o nome de Dynamic

Matrix Control (DMC). Independente da peculiaridade dos controladores apresentados por Richalet e Cutler (MPHC e DMC), a característica principal é a previsibilidade e antecipação ao erro para manutenção do sistema próximo de uma região “ótima”. O MPC, devido a características da malha fechada tornou-se apropriado para controle de processos com dinâmica complexas, como processos com tempo-morto, acoplamento, dinâmicas não lineares, múltiplas entradas e saídas, restrições, etc. O controlador preditivo tem como característica construtiva a caracterização da estratégia sob medida para a solução de controle da planta, contribuindo de maneira significativa na condução econômica do processo.

O controle preditivo baseado em modelo (MPC – Model Predictive Control) surge atualmente como uma das mais populares e eficientes estratégias de controle na indústria de processos. Muitos dos aspectos fundamentais num projeto de controle industrial prático podem ser explorados num controle preditivo baseado em modelo, como a trajetória de referência futura, previsão de perturbações e a possibilidade de inclusão de restrições, verificando a flexibilidade desta técnica de controle (E. F., Bordons e Camacho, 1999).

A grande maioria dos problemas relacionados ao controle regulatório requer, de maneira geral, a representação matemática do processo a ser controlado. Esta representação é comumente derivada a partir das leis da física que governam o fenômeno ou então por meio de ensaios experimentais que procuram extrair as principais características do processo que se deseja controlar (Campos, M. M., Teixeira, 2006).

Neste artigo pretende-se avaliar o desempenho do controlador MCP em relação ao controlador PID, levando em consideração a aderência do modelo matemático do processo em relação à característica e/ou peculiaridade dos controladores em questão. A malha de controle de vazão de ar, selecionada para este projeto, é parte integrante de um conjunto de estratégias regulatórias para o processo de craqueamento catalítico. A utilização do sistema de controle digital DeltaV, para a implementação controle preditivo, justifica-se pela disponibilidade de expansão da arquitetura existente, não sendo necessário investimento para aquisição de licença de hardware, software e instrumentação campo. Este artigo está estruturado de acordo conforme as seguintes etapas: breve histórico do controle avançado na indústria do petróleo, o ambiente DeltaV, implementação do

controle preditivo em substituição ao PID, avaliação comparativa de desempenho entre PID e MCP e considerações finais.

## **2 O CONTROLE AVANÇADO NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO**

De acordo com as condições mercadológicas decorrentes da variação do preço e política interna dos maiores produtores de petróleo, o mercado torna-se cada vez mais competitivo. Estes são alguns dos fatores principais e motivadores para a busca da otimização das operações das unidades de prospecção, produção e distribuição de derivados de petróleo. Os investimentos em pesquisa e desenvolvimento se fazem necessários na cadeia produtiva de maneira a tornar cada vez mais eficientes o processamento de derivados. Em particular, as unidades de refino empregam o controle avançado (MPC) com uma abordagem de maximização da oferta de derivados e diminuição significativa das emissões atmosféricas. A preocupação e compromisso com os aspectos da sustentabilidade ambiental, introduz um novo componente na função objetiva de controle regulatório. No refino, o controlador preditivo (MCP) por ser uma técnica consolidada (20 anos) torna-se atrativa como aplicação para a otimização de plantas de destilação atmosférica e a vácuo, fornos, caldeiras, em detrimento da complexidade dos modelos matemáticos, e em função da complexidade das correlações da função de transferência da planta (sistemas não lineares). Na prospecção de campos petrolíferos a aplicação do sistema de controle avançado, é utilizada na solução de problemas relacionados com os sistemas de controle de lastro, escoamento da produção, sistema de controle de pressão de golfadas do poço, sistema instrumentado de segurança, otimização da produção, controle multivariável, controle de compressores, etc.

## **3 ESTUDO DE CASO**

Este artigo tem como objetivo principal a implementação e comparação de desempenho do controlador preditivo comercial (SISO), em substituição a um controle PID convencional (SISO). Também será analisado a aderência do modelo matemático do processo cuja identificação é proveniente do MPC Predict. A plataforma de controle que será utilizado neste estudo será o sistema digital de



controle distribuído (SDCD) e/ou sistema digital de controle (SDC) de fabricação da empresa Emerson Process Management. A justificativa para a construção do controlador preditivo em sistema DeltaV, é pelo simples fato da malha escolhida para o estudo estar residente em plataforma cuja sistema está em operação operação em uma unidade de pesquisa (craqueamento catalítico), e oferece as condições necessárias para a implementação, não se caracterizando nenhum tipo de preferencia comercial. O controlador PID é um bloco de controle implementando através da ferramenta computacional Control Studio. O sistema DeltaV disponibiliza para o usuário do sistema e/ou operador, uma interface de controle que possibilita a interação com a planta a ser controlada. Na figura 1 mostra-se um frontal do controlador PID da malha de vazão de ar, esta é uma interface (template) disponível na “biblioteca” de símbolos dinâmicos do sistema digital de controle Emerson Process.

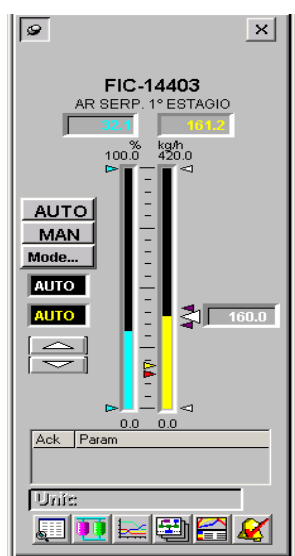


Figura 1 – Visão Frontal do controlador PID

A execução do projeto de provimento do controle preditivo concentrar-se-á somente no ambiente computacional, não sendo necessária nenhuma alteração da estrutura física de campo. A estimativa de custo do projeto do MCP, baseado somente nos custos de HH engenharia e operação (homem hora), devido ao fato explanado em parágrafos anteriores com relação á infra-estrutura disponível (hardware, licença Predict, etc).

## 4 O AMBIENTE MPC DELTA V

O sistema de controle digital da empresa Emerson Process Management, fornece bloco funcional para controle preditivo MPC. O sistema DeltaV, disponibiliza ferramentas de desenvolvimento da aplicação chamado de “Predict” e um aplicativo de operação. Segundo o fabricante Emerson, o DeltaV Predict possibilita a construção de um controlador com estratégias complexas relacionadas com PID, controle antecipatório de perturbações, desacoplamento, controle seletivo, otimização para maximização de rendimento. As principais características do Bloco de controle Predict, são:

- 1 não há camada de otimização;
- 2 limitado no máximo á quatro controladas, quatro restrições, quatro manipuladas e quatro perturbações;
- 3 utiliza fatores de penalização para manipulada e controlada;
- 4 possibilita a aplicação da otimização de manipulada “livre”
- 5 permite controle com restrições;
- 6 a interface de operação e gerada automaticamente;
- 7 sintonia automática com a ferramenta do DeltaV Predict;
- 8 obtenção do modelo e/ou função de transferencia da planta, malha.

O controle de processos com multiplas entradas e saidas (MIMO) é uma das aplicações típicas do DeltaV Predict, em função da facilidade da contrução das correlações de controle (desacoplamento), por meio da linguagem de blocos de controle preditivo. É possível resolver com o bloco MCP DeltaV, processos com diversas fontes de perturbações, com a utilização do controle antecipatório. Outra característica do MPC Predict é a resolução de restrições associadas com uma dinamica complexa, podendo ser resolvida com controle seletivo (override). o fabricante ressalta, que é possível solucionar problemas de controle de processos com dinâmica complexa tais como: tempo morto ou resposta inversa, os quais são difíceis de controlar com técnicas tradicionais, como PID, Smith Predictor, etc. O Bloco controlador MCP Predict DeltaV é baseado em um modelo dinâmico do processo, resposta ao degrau e/ou ao impulso. O algoritmo de controle é gerado a partir do modelo do processo. A ação de controle do Bloco MCP Predict é baseada

na resposta futura calculada com base no modelo do processo. Toda a ação de controle é originada em função dos ajustes passados e os efeitos das perturbações é incorporado automaticamente na predição das controladas e restrições. Como parte da função objetiva o bloco MPC Predict, calcula os valores desejados para as controladas e restrições, estabelecendo a trajetória de referência. O modelo de resposta ao degrau para o bloco MPC Predict é obtido em função da resposta de uma saída de processo em relação a uma variação em degrau na entrada. Esta resposta é obtida mantendo-se as outras entradas com valores constantes. A partir da resposta a excitação de uma entrada o bloco MPC Predict calcula os coeficientes ( $A_x, B_x$ ) até a estabilização e/ou estado estacionário (Time to Steady State). O tempo de amostragem de um módulo de controle (cartão controlador do SDCD DeltaV) contendo um bloco MPC Predict deve ser configurado em torno de 1 segundo ou menos, segundo recomendação do fabricante. Esta configuração garantirá que o bloco MPC Predict irá executar em um tempo de 1 segundo a aquisição dos 120 pontos necessários para a correlação e estimativa dos coeficientes (Time to Steady State/120). Na figura 2 é mostrado a estrutura do bloco controlador MPC Predict Emerson Process, o qual será utilizado na malha de controle de vazão de ar.

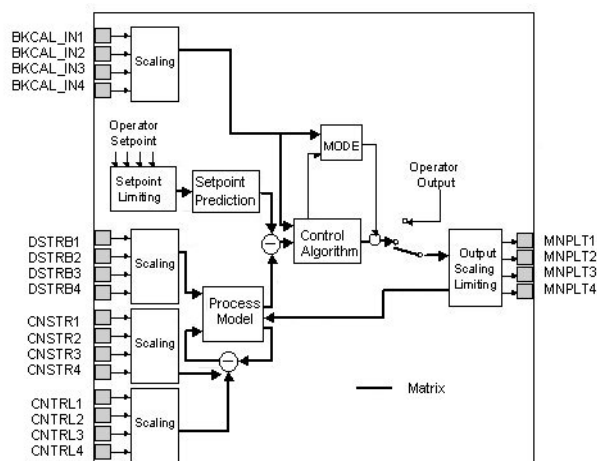


Figura 2 – Bloco de controle MPC Predict

## 5 IMPLEMENTAÇÃO DO BLOCO MCP PREDICT

Para a implementação do controlador DeltaV MPC, foi necessário um planejamento prévio, buscando diminuir ao máximo, a intervenção na unidade piloto de pesquisa, por um período superior ao planejado. A preocupação com a

disponibilidade e manutenibilidade operacional da planta de pesquisa dever-se-á ao fato do comprometimento do cronograma de testes e/ou pesquisa e desenvolvimento. A princípio manteve-se a estrutura de entrada e saída do bloco PID da malha de controle de vazão, como variável controlada e manipulada para o Bloco MPC DeltaV Predict. A seguir é disponibilizada de maneira resumida, a seqüência adotada para a configuração do bloco MPC em conformidade com as orientações encontradas no manual do equipamento. Na figura 3 é mostrada a seqüência funcional da atividade de configuração do sistema DeltaV.

1. Criação do Módulo contendo bloco MPC, utilizando biblioteca advanced;
2. Configuração da variável manipulada e controlada;
3. Execução de carga do sistema (download) contendo o bloco MPC;
4. Ativação e/ou habilitação do banco de dados DeltaV Historian;
5. 5-Iniciar o processo de identificação do modelo e/ou função de transferência, utilizando a ferramenta DeltaV Predict;
6. Criação da interface de operação do MPC, utilizando a biblioteca de dinâmicos do sistema DeltaV;
7. Análise dos resultados após processo de identificação;
8. Validação dos parâmetros, carga do sistema com os parâmetros do controlador.

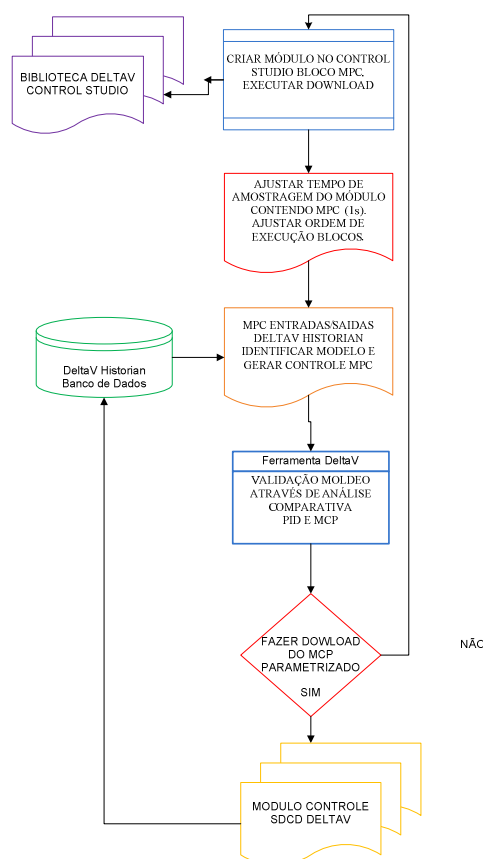


Figura 3 – Procedimento configuração do controlador Preditivo

A partir da ferramenta DeltaV Advanced Control Predict e/ou no ambiente Control Studio foi possível fazer a seleção do bloco MPC e parametrizar as variáveis da aplicação. O MPC DeltaV Predict é um bloco funcional extensível (extensible parâmetro) o que possibilitou com maior facilidade a definição do número de entradas e saídas requeridas pela aplicação e/ou estratégia de controle. Na configuração dos parâmetros do Bloco MPC é permitido adicionar a descrição das variáveis de entrada e saída, filtro, limites inferiores e superiores para a aplicação e/ou estratégia. Na figura 4 é possível visualizar o controlador MPC, construído a com base na biblioteca disponível na ferramenta Control Studio.

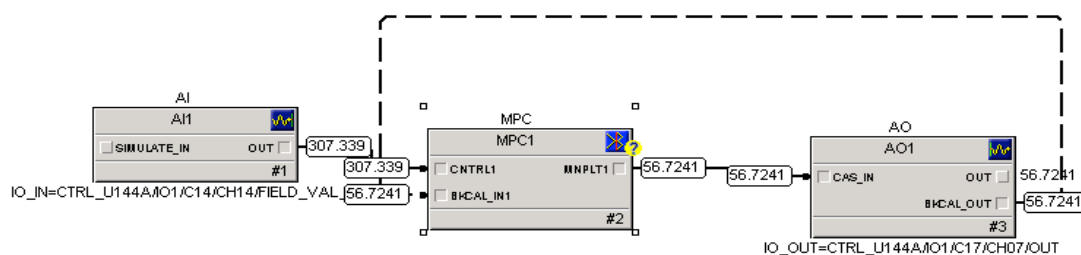


Figura 4 – Controlador Preditivo MPC para a malha de vazão de ar, AI (entrada) AO (saída)

Após a criação e parametrização da estratégia de controle, utilizando o conjunto de blocos funcionais (MPC, AO AI), fornecidos pela aplicação Control Studio, procedeu-se no dowload para o modulo de controle. Com o modulo de controle on-line selecionou-se a ferramenta MPC Operation e DeltaV Predict, de maneira a iniciar-se o processo de identificação do processo (função de transferência). Na figura 5 é mostrado o DeltaV Predict durante o processo de identificação do processo.

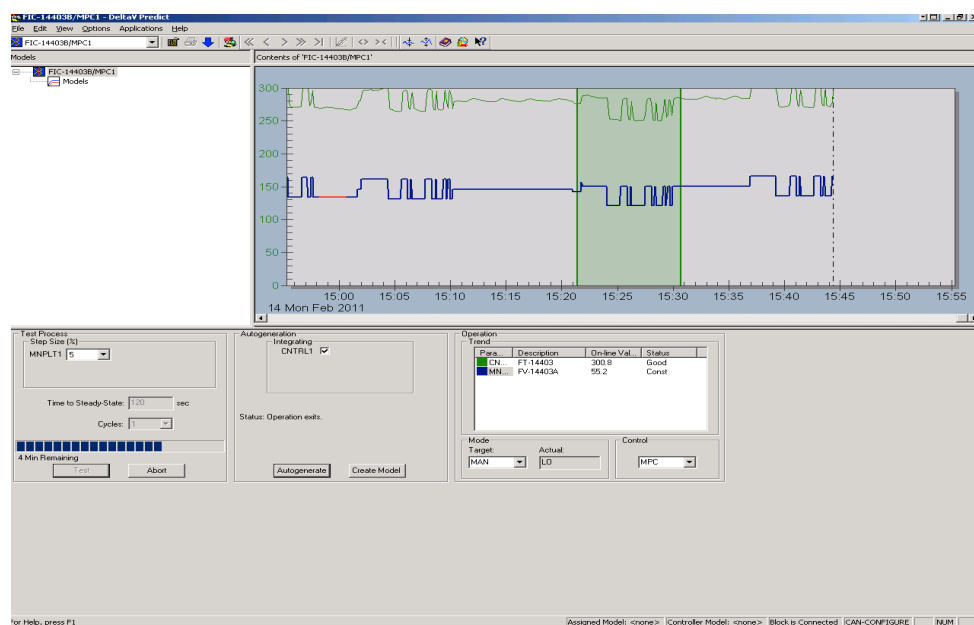


Figura 5 – Processo de identificação do modelo do processo através DeltaV Predict

O processo de obtenção da função transferência e/ou modelo matemático do processo foi obtido em um período de +/-12 minutos, tempo necessário para que o

sistema consiga cobrir toda a faixa de dinâmica do processo. Logo após o término da identificação foi possível obter através da função autogenerate, o modelo do processo e/ou função de transferência. Na figura 6 observa-se que o DeltaV Predict disponibiliza através caixa de diálogo, as constantes de tempo, tempo morto, ganho do processo. O usuário poderá aceitar estes valores e/ou alterá-los de acordo com a particularidade do processo e/ou objetivo da aplicação. Esta opção de inserção de novos parâmetros pode ser interessante em situações em que o usuário já dispõe função de transferência e/ou modelo matemático do processo, obtido através de outras ferramentas computacionais de identificação.

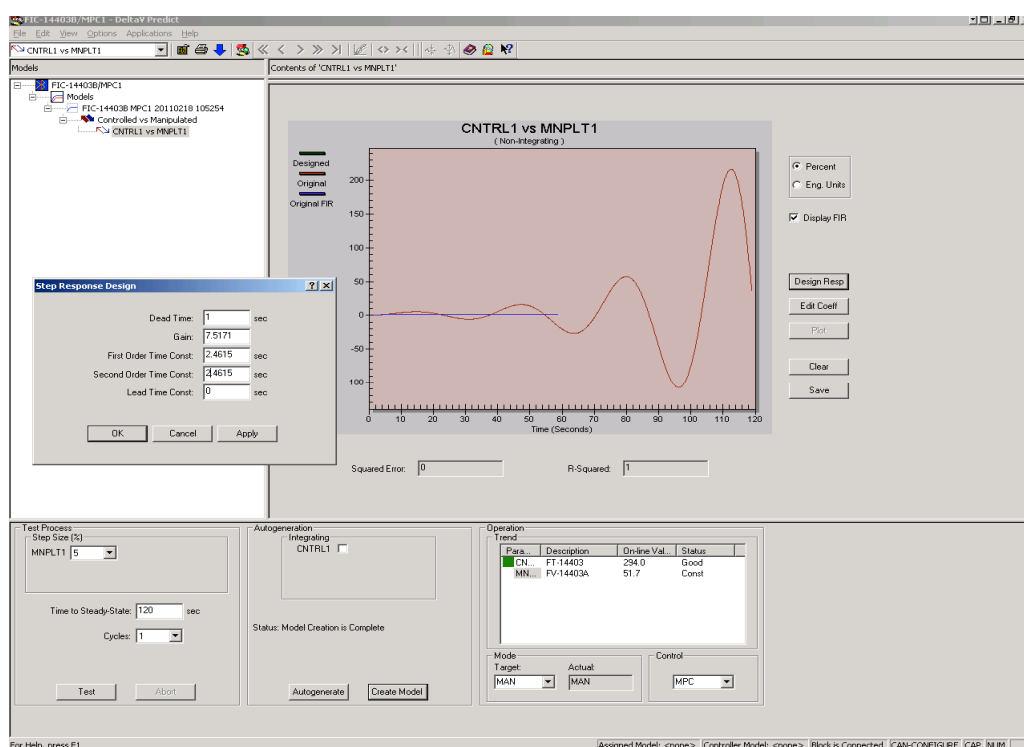


Figura 6 – Processo de identificação do Modelo Matemático do processo, Ganho, Tempo Morto, Tempo de Resposta, Caracterização da ordem sistema

Cabe destacar que é de suma importância a habilitação do banco de dados DeltaV Historian, após o download da aplicação. Ao habilitar o banco de dados DeltaV Historian, todas as variáveis de entrada e saída que farão parte da dinâmica do processo, serão armazenadas em intervalos de tempo preestabelecido. O banco de dados History Collection é requerido durante o processo de identificação, desta maneira é imprescindível aplicar o procedimento citado no parágrafo anterior.

## 6 AVALIAÇÃO COMPARATIVA PID E MPC

### 6.1 CONTROLADOR PID

A priori, o controlador PID da malha de vazão foi sintonizada com parâmetros obtidos pela metodologia desenvolvida por Ziegler & Nichols. A simulação e validação do modelo matemático e/ou função de transferência do processo foi realizada através da ferramenta computacional MatLaB. Na figura 7 e 8 é possível visualizar a curva de de resposta do processo e os resultados da simulação MatlaB.

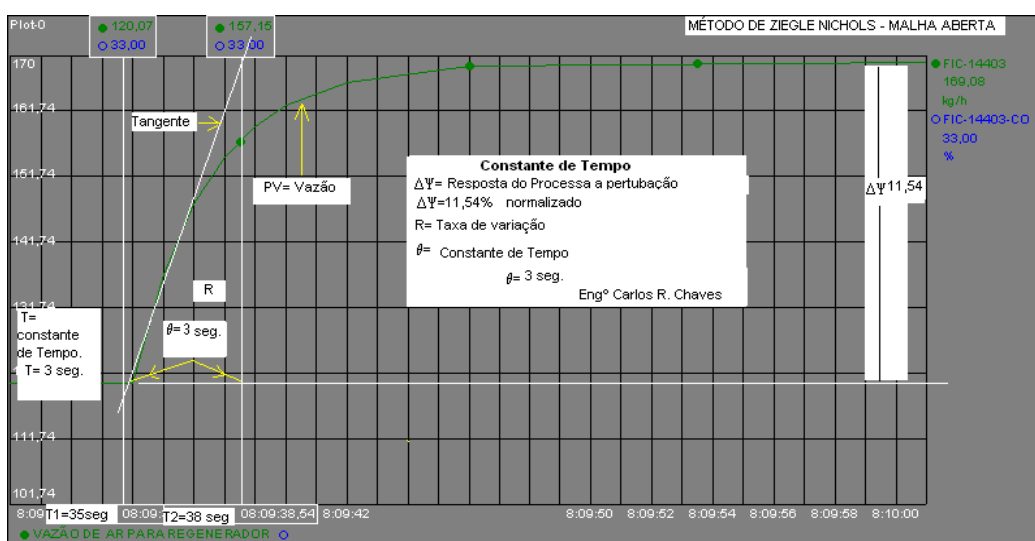


Figura 7 – Curva de resposta para obtenção da função de transferência do processo e posterior obtenção dos parâmetros PID



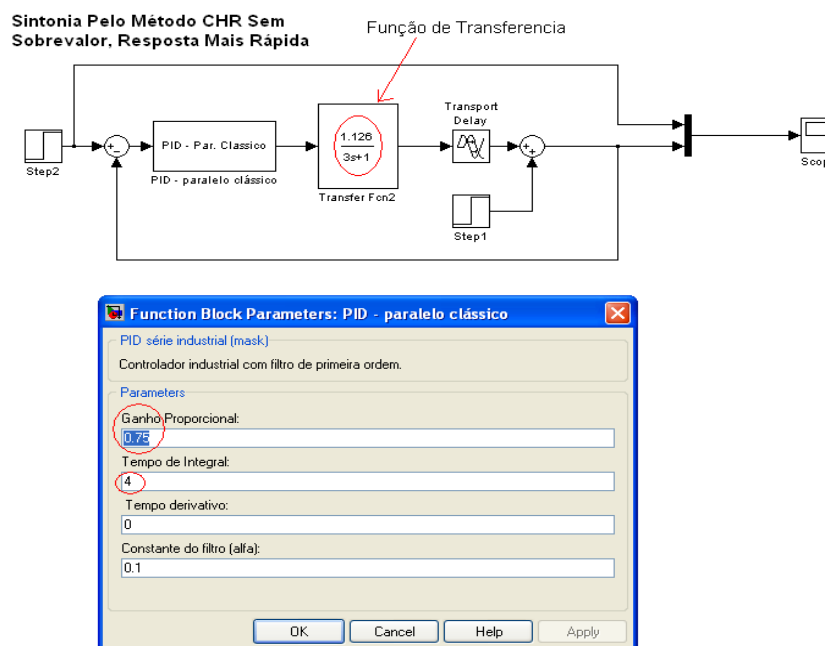


Figura 8 – Validação dos parâmetros PID do Controlador através do MatLaB

O resultado da simulação no Matlab com a utilização dos valores das constantes  $K_p$  e  $T_i$  encontradas, calculados com método Ziegler & Nichols é disponibilizado de acordo com o gráfico da figura 10.

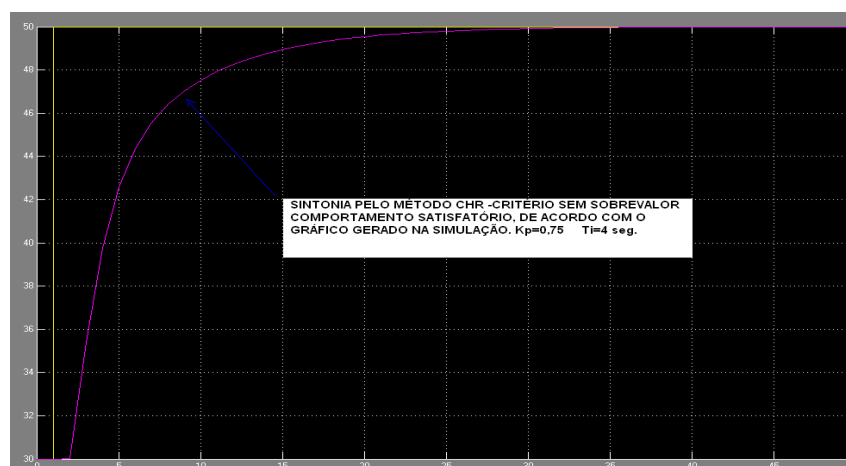


Figura 10 – Resultado da Simulação Matlab, Sintonia pelo método Ziegler e Nichols – critério sem sobre valor – Simulink

Após a validação no Matlab e posterior parametrização do controlador PID da malha de vazão de ar, o comportamento dinâmico da mesma apresentou um desempenho satisfatório com relação aos aspectos de variabilidade dentro da faixa operacional da unidade. Contudo após um determinado intervalo de tempo de

operação da unidade de observou-se uma degradação do controle regulatório PID, de acordo com a figura 11.

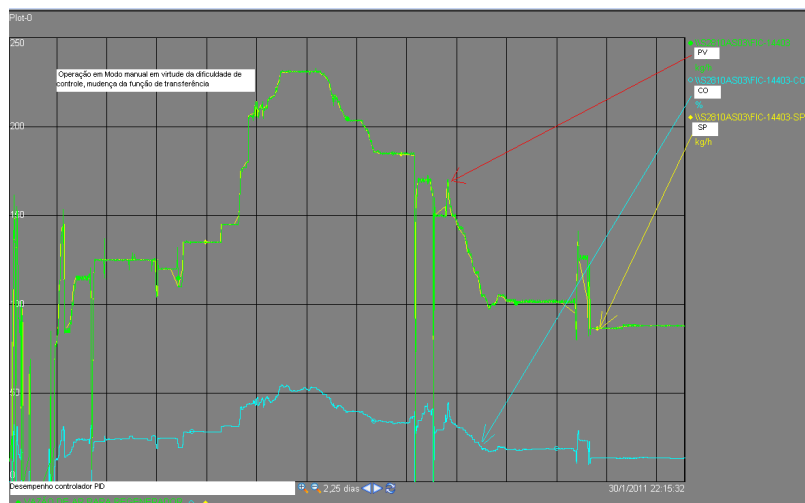


Figura 11 – Gráfico gerado após a sintonia da malha de controle de vazão de ar

Após análise detalhada da malha de controle, foram evidenciadas as principais fontes contribuintes para uma eventual alteração da função de transferência do processo, tais como: desgaste acentuado nos componentes internos do elemento final de controle (válvula de controle), obstrução parcial de permutadores e/ou trocadores de calor, sistema de circulação de produtos e catalisadores etc. A conclusão que se faz, é que, o controlador PID não disponibiliza mecanismos e/ou recursos de identificação e/ou discretização quanto a distúrbio de carga ou mudança do modelo matemático (função de transferência). Esta é uma das razões que torna atrativo o controle preditivo, em função da possibilidade de processamento matemático de auto correlação, adaptativo (algoritmo genético).

## 6.2 CONTROLADOR MCP PREDICT

Avaliando o resultado obtido através da aplicação MPC DeltaV Predict, observou-se uma aproximação dos resultados na constante de tempo do processo e tempo de atraso do processo e/ou tempo morto, o ganho do processo entre o MPC e PID ficou sensivelmente diferente. A princípio procuramos executar o teste mantendo-se as condições operacionais da unidade piloto, porém em virtude das variações da carga (tipo de petróleo), condições de desgastes do elemento final de

controle, ruído, poder-se-ia incorrer em uma diferença significativa do ganho para MPC.

Tabela 1 – Avaliação parâmetros de processos entre PID e MPC

Constante de Tempo PID	Constante de Tempo MPC	Tempo Morto PID	Tempo Morto MPC	Ganho PID	Ganho MPC
3 seg.	2,46 seg.	1 seg.	1 seg.	0,75	2,5

Durante o período de avaliação de operação da malha com o controlador MCP, observou-se uma estabilidade de controle em uma região mais ampla. Esta característica de aumento da faixa de controle traduz em diminuição da variabilidade. A justificativa para este desempenho satisfatório deve-se a robustez do modelo, opção de configuração do bloco de controle MCP com diversos recursos voltados para o modelo em questão. Retornando a análise do comportamento do controlador MCP DeltaV Predict, observou-se que a variável de processo permaneceu próxima ao valor de set-point, a variabilidade da malha manteve-se dentro dos limites estabelecidos inicialmente durante o processo de configuração do bloco MPC, com base no horizonte de predição.

Na figura 12 pode-se observar-se o comportamento do controlador MCP em relação ao horizonte de predição, instante presente faixa verde (futuro faixa à esquerda).

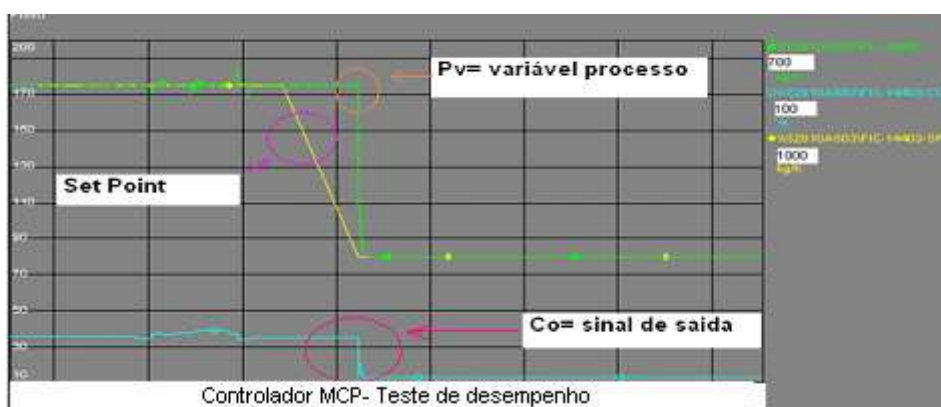


Figura 12 – Comportamento da malha com controlador MCP

## 7 CONCLUSÕES

Com base no desempenho entre um controlador PID e MCP, retrata-se a vulnerabilidade do controle clássico PID em relação às variações do modelo matemático do processo. Esta alteração estrutural da função de transferência do processo pode ocorrer ao longo do período de campanha de uma unidade, planta e/ou sistema. Neste contexto o controlador preditivo apesar de ser aplicado a uma malha do tipo SISO, ainda assim, oferece uma previsibilidade quanto às variações futuras, de natureza de carga e/ou de processo (função de transferência). Outro fator atrativo no controle preditivo, é a possibilidade de interconectar as diversas funções objetivas, tais como custo, emissões atmosféricas, etc. A busca incessante pela eficiência energética é a grande motivação para a busca da compreensão e identificação do comportamento das unidades produtivas, e com isto, implementar esforços computacionais dotados de previsibilidade futura. O custo computacional envolvido, como é comum nos algoritmos de controle avançado, é compensado pela otimização, aumento da capacidade produtiva e rentabilidade do negócio.

## 8 AGRADECIMENTOS

Nossos agradecimentos aos colegas da Petrobras, pela oportunidade e apoio: Engº Luiz Carlos Casavechia, Rafael Pedroso, Rodrigo Gobbo, Hélio Toshio Sakurai, Eloy Zeni Junior, Simon Levenhagen Lopes, Pedro Silvino e Operadores da Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento da SIX.

## 9 REFERÊNCIAS

CAMACHO, E. F., BORDONS, C. *Model Predictive Control*. London: Springer 1999.

CAMPOS, M. M., TEIXEIRA, H. *Controles típicos de equipamentos e processos industriais*. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

EMERSON PROCESS MANAGEMENT. *DeltaV Book's Online*. Sorocaba, 2010. Disponível em: <<http://www.emersonprocess.com.br>>. Acesso em: 4 mar. 2011.

MORARI, M.; LEE, J. H. Model predictive control: past, present and future. *Comput. Chem. Eng.*, v. 23, p. 667-682, 1999.

ZAMBRONE, D., CAMACHO, E.F., *Application of MPC with Multiple Objective for a Solar Refrigeration Plant*. IEEE Conference on Control Applications. Escócia: Glasgow, 2002.

## **ANEXO C – Artigo sobre MPC apresentado na ISA International USA 2011**

### **Identification for Industrial Model Predictive Controllers**

Carlos Roberto Chaves, Gustavo Oliveira, Gideon Villar Leonardo, José Manoel

#### **ABSTRACT**

This article aims at evaluating the performance and adherence of the transfer function of an airflow process control, obtained by the mathematical modeling identification tool available in the model predictive controller (MPC) regarding the Ziegler-Nichols method. The purpose of this article relies on comparing results obtained between two identification methods. Further constructive aspects and MPC performance are also mentioned; however they are not the main goal of this article. Evaluation of identification process of the transfer function through MPC was limited to the DeltaV system environment. Implementing the identification process through the DeltaV SDCD predictive control module is due to the system operational availability once installed in the research unit, and mainly because it does not involve additional costs for implementing the predictive control. It becomes paramount to highlight that this article approaches the SISO control system, which is object of study for evaluating MPC performance as an identification tool. Even as a SISO control loop, it was noticed that the relative gain resulting from the decrease of variation was substantial, as a consequence of the identification process tool adherence. The relevance in identifying the process transfer function with greater adherence to plant behavior exceptionally legitimates the constructive strength of the MPC controller, thus represented by standards and control purposes towards a prediction horizon. It is worth noting that even as a single-loop (SISO), identifying the mathematical model and/or process transfer function engenders substantial earnings in variation decrease of control variables relevant to the productive process as a consequence favorable to an increase of the operational scope of productive units in the oil segment.

Keywords: Controllers. Predictive Model.

#### **1 INTRODUCTION**

The model-based predictive control (“Model Predictive Control”) is a powerful controlling technique well-developed and strengthened in the last decades. It is a process advanced control method which has been used widely, including in processing industries applications, such as: chemical, petrochemical, paper and aeronautics branches. The first model-based predictive control application known was published by Richalet in 1978, the Model Predictive Heuristic Control (MPHC). About the same time, Shell Cutler and Rademaker engineers developed a predictive controller (MPC) known as the Dynamic Matrix Control (DMC). Notwithstanding the particularity of the controllers presented by Richalet and Cutler (MPHC and DMC, respectively), its foremost feature is the predictability and anticipation of failures for maintenance of the system near an “optimum” level. On account of its closed-loop feature MPC has become appropriate for process controlling with complex dynamics, such as process dead time, coupling, nonlinear dynamics, multiple inputs and outputs, restrictions, etc. The predictive controller has as its constructive feature the custom-designed strategy characterization to solve the plant control, significantly contributing for saving performance of the process.

The model-based predictive control (MPC – Model Predictive Control) currently rises as one of the most popular and efficient control strategies in the processing industry. Many paramount aspects in a practical industrial control project might be examined in model-based predictive control, such as the future reference-trajectory, disturbance forecasts and the chances of inclusion of restrictions, checking the flexibility of this control technique (CAMACHO; BORDONS, 1999).

The majority of regulatory control-related issues generally requires the mathematical representation of the process to be controlled. Usually this representation derives from physical laws controlling the phenomenon or from experimental tests aiming at obtaining process main characteristics to be controlled (CAMPOS; TEIXEIRA, 2006).

This article seeks to evaluate the MPC controller performance regarding PID (Proportional–Integral–Derivative) controller, taking into account the process mathematical model adherence compared to the features and/or particularity of the controllers hereof. The airflow loop control chosen for this project is part of a group of

regulatory strategies for the catalytic cracking process. Using DeltaV digital control system for implementing predictive control is done on account of the possibility of expanding the existing architecture, thus exempting the need for investment to obtain hardware, software and field instrumentalization licenses. This article is divided in the following sections: brief history of advanced control in the oil industry, DeltaV environment, predictive control implementation in replacement of PID, comparative evaluation of performances between PID and MPC, and final considerations.

## **2 THE ADVANCED CONTROL IN OIL INDUSTRY**

According to market conditions arising from price variation and internal policies of the biggest oil producers, market itself becomes even more competitive. These are some of the main and driving aspects to pursuit optimization of exploration and production units operation and distribution of oil products. Investments on research and development are needed in the productive chain in order to make the processing of products even more effective. Especially in refineries the advanced control (MPC) is applied based on an approach of maximization of products offer and substantial reduction of atmospheric emissions. Concernment and commitment with environmental sustainability aspects presents a new component in the regulatory control objective function. In refining, the predictive controller (MPC) as a reinforced technique (20 years) becomes appealing as an application seeking optimization of atmospheric distillation and vacuum plants, furnaces and boilers, at the expense of the complexity of mathematical models, and due to the complexity of correlations of plant's transfer function (nonlinear systems). In exploration of oil fields the application of advanced control system is done in solving problems related to ballast control system, production outflow, control system of slug flow pressure in wells, safety instrumented system, production optimization, multivariable control, compressor controls, etc.

## **3 CASE STUDY**

The main purpose of this article is to evaluate the adherence of the process transfer function identification method of DeltaV's commercial predictive controller regarding both Ziegler-Nichols and Chien–Hrones–Reswick (CHR) methods. The computing environment for this implementation was developed in a conventional PID



control loop (SISO). The object of analysis is the adherence of the mathematical model of process which identification results from MPC Predict. The control platform to be applied in this study will be the distributed digital control system (DDCS) and/or digital control system (DCS) manufactured by Emerson Process Management. We chose this tool available in DeltaV system through MPC Predict module simply because of the possibility of intervention in a SISO loop, which is operating in a DeltaV platform. DeltaV system is operating in a research unit (catalytic cracking) and offers favorable conditions for implementation, without any kind of trade preference. PID controller is a control block implemented through a computing tool called Control Studio. DeltaV system provides for the user and/or system operator a control interface which enables interaction with the plant to be controlled. Figure 1 shows the front view of the airflow loop PID controller, an interface (template) available in the “library” of dynamic symbols of the Emerson Process digital control system.

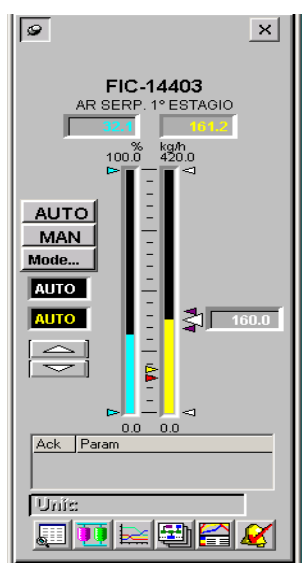


Figure 1 - PID controller front view

Execution of the predictive control supply project will focus only on computing environment, exempting the need of any change in the field physical structure. Cost estimation of MPC project will be based only on man-hours engineering and operation expenses, due to fact aforementioned in previous paragraphs regarding available infrastructure (hardware, Predict license, etc).

#### 4 DELTAV MPC ENVIRONMENT

Emerson Process Management digital control system provides functional block diagrams for MPC predictive control. DeltaV system provides development tools of the application called “Predict” as well as an operation application. According to Emerson manufacturer, DeltaV Predict enables the construction of a controller with complex strategies related to PID, disturbance forecast control, decoupling, selective control, optimization for maximizing yield. Predict control block main features are the following:

- 9 There is no optimization layer;
- 10 It is limited up to four controlled variables, four restrictions, four manipulated variables, and four disturbances;
- 11 It uses penalty factors for manipulated and controlled variables;
- 12 It enables applying manipulated-free optimization
- 13 It enables controlling with restrictions;
- 14 Operational interface is generated automatically;
- 15 Automatic synchrony with DeltaV Predict tool;
- 16 Achievement of plant’s transfer model and/or function, loop.

Process control with multiple inputs and outputs (MIMO) is one of the typical DeltaV Predict applications, due to easiness of constructing control correlations (decoupling) through predictive control blocks. It is possible to solve processes presenting a broad range of disturbance sources with the MPC DeltaV block through anticipation control. Another MPC Predict feature is solving restrictions associated with complex dynamics, which might be solved with selective control (override). The manufacturer highlights the possibility to solve process control issues with complex dynamics, such as: dead time or inverse response, which are difficult to control by means of traditional techniques such as PID, Smith Predictor, etc. DeltaV MPC Predict control block is based on a process dynamic model, response to the step and/or impulse. The control algorithm is created from the process model. MPC Predict Block control action is based on the future response computed regarding the process model. Every control action is created due to previous adjustments, and the disturbances consequences are incorporated automatically in forecasting restrictions and controlled variables. As a component of the MPC Predict objective function, it computes desired values for restrictions and controlled variables, setting the

reference trajectory. The response model to step for the MPC Predict block is obtained based on a process output response regarding input step variation. This response is achieved by keeping other inputs with constant values. From the excitation response of an input MPC Predict block estimates coefficients ( $A_x, B_x$ ) up to stabilization and/or stationary state (Time to Steady State). The time of sampling of a control module (DeltaV DDCS controlling card) with a MPC Predict block must be set in around 1 second, accordingly to manufacturer's advice. This setup will ensure that the MPC Predict block will obtain 120 needed points in 1 second for correlation and coefficient estimates (Time to Steady State/120). Figure 2 presents the structure of the Emerson Process MPC Predict controller block, which will be used in the airflow control loop.

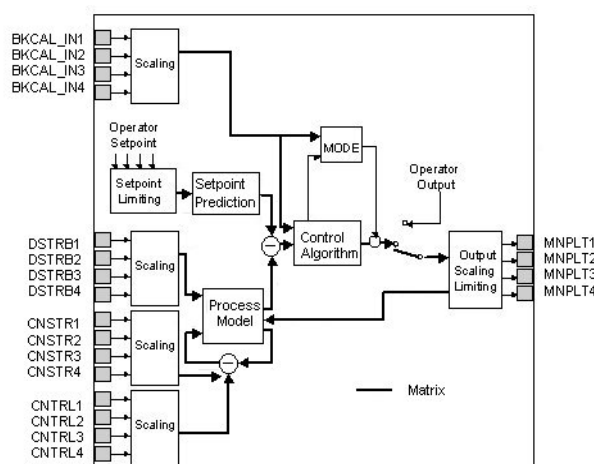


Figure 2 - MPC Predict control block

## 5 IMPLEMENTATION OF THE MCP PREDICT BLOCK FOR IDENTIFYING PROCESS TRANSFER FUNCTION

In order to implement the identification process of the transfer function and/or mathematical model, firstly, it was necessary to setup both predictive and control modules available in the DeltaV system advanced control library. It is worth noting that the activities to be executed needed to be previously planned, aiming at decreasing impacts as much as possible in the availability and reliability features of the pilot research unit. Concernments towards research unit's availability and operational maintenance feasibility must be based on account of the test schedule commitment and/or research and development. At the beginning the input and output

structure of the PID block flow control loop was maintained as a controlled and manipulated variable for the DeltaV Predict MPC Block. Next, the sequence for configuration of MPC block is provided in a resumed version in accordance with guidelines found in the equipment manual. Figure 3 presents the functional sequence of DeltaV system configuration activity.

9. Create Module with MPC block using the advanced library;
10. Setup of manipulated and controlled variable;
11. Run system download with MPC block;
12. Activate and/or enable DeltaV Historian database;
13. 5-Start model identification process and/or transfer function by using the DeltaV Predict tool;
14. Create of MPC operational interface by using DeltaV system dynamics library;
15. Analyze results after identification process;
16. Validate download system parameters with controller parameters.

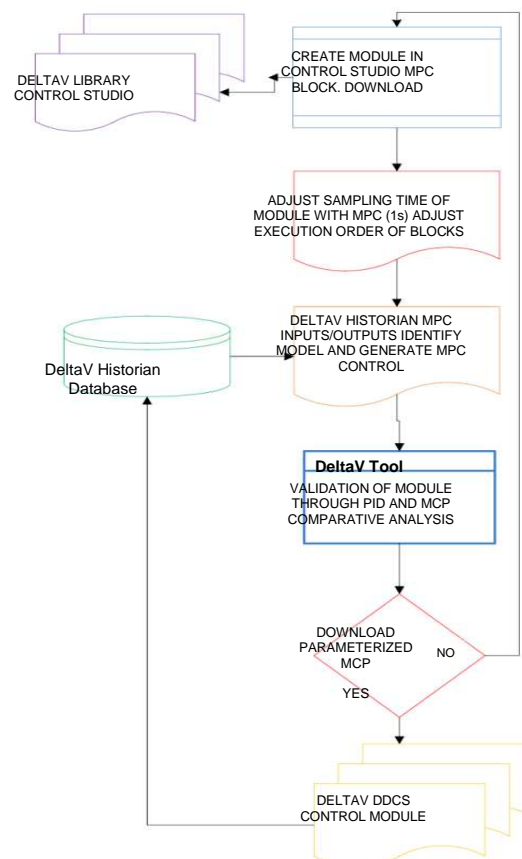


Figure 3 – Predictive controller setup procedure

From DeltaV Advanced Control Predict tool and/or in Control Studio environment it was possible to choose the MPC block and set parameters for application variables. MPC DeltaV Predict is an extensible functional block (extensible parameter) enabling a greater facility in defining the number of inputs and outputs required for the application and/or control strategy. In MPC Block parameters setup it is possible to add input and output variable descriptions, filter, higher and lower limits for application and/or strategy. In Figure 4 you can see the MPC controller built on the library available in Control Studio tool.

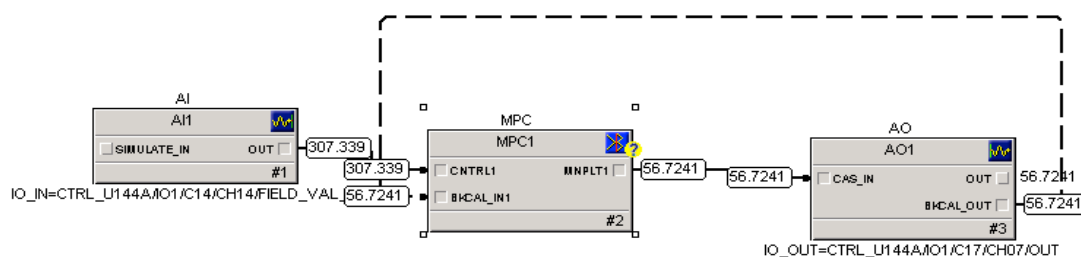


Figure 4 – MPC Predictive Controller for airflow loop, AI (input) AO (output)

After creating and setting parameters for control strategy using the functional blocks assembly (MPC, AO AI), which were provided by the Control Studio application, the download of the control module started. With the control module online, choose MPC Operation and DeltaV Predict tools in order to start identifying the process (obtaining the transfer function). Figure 5 presents DeltaV Predict through identification process.

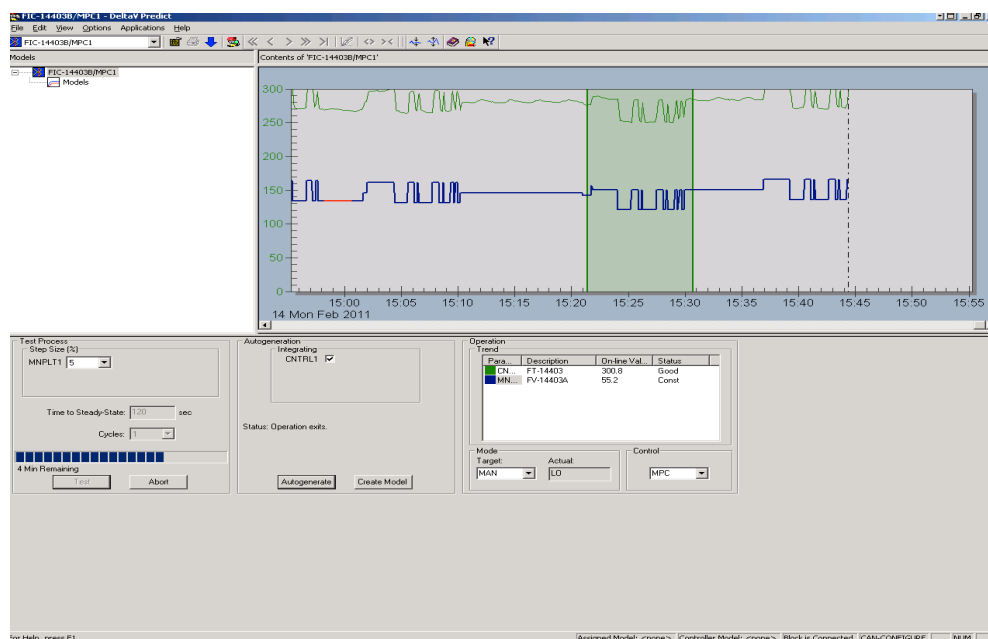


Figure 5 – Identification process of process model through DeltaV Predict use.

The obtaining process of the transfer function and/or process' mathematical model was achieved in around 12 minutes, time necessary for the system to cover the entire process dynamic band. Soon after the identification completion it was possible to obtain the process model and/or transfer function through autogenerate function. In figure 6 it is possible to notice that DeltaV Predict enables time constants, dead time, process gain in a dialog box. User may accept these values and/or change them accordingly to the process specificity and/or the application purpose. This option of inserting new parameters might be interesting for situations where user already has an available transfer function and/or process mathematical model, achieved through other identification computing tools. Another key detail of the transfer function identification process hereof is the process availability to enable increase in opening and closing of the control final element which ranges from 10% of the instantaneous value. It is highlighted that throughout identification process the MPC Predict controller enables the opening and closing (Relay Method) of the control final element aiming at creating dynamics, hence obtaining  $A_x$  and  $B_x$  coefficients. Thus, the process transfer function obtained through the method will present higher effectiveness and adherence with the plant real behavior.

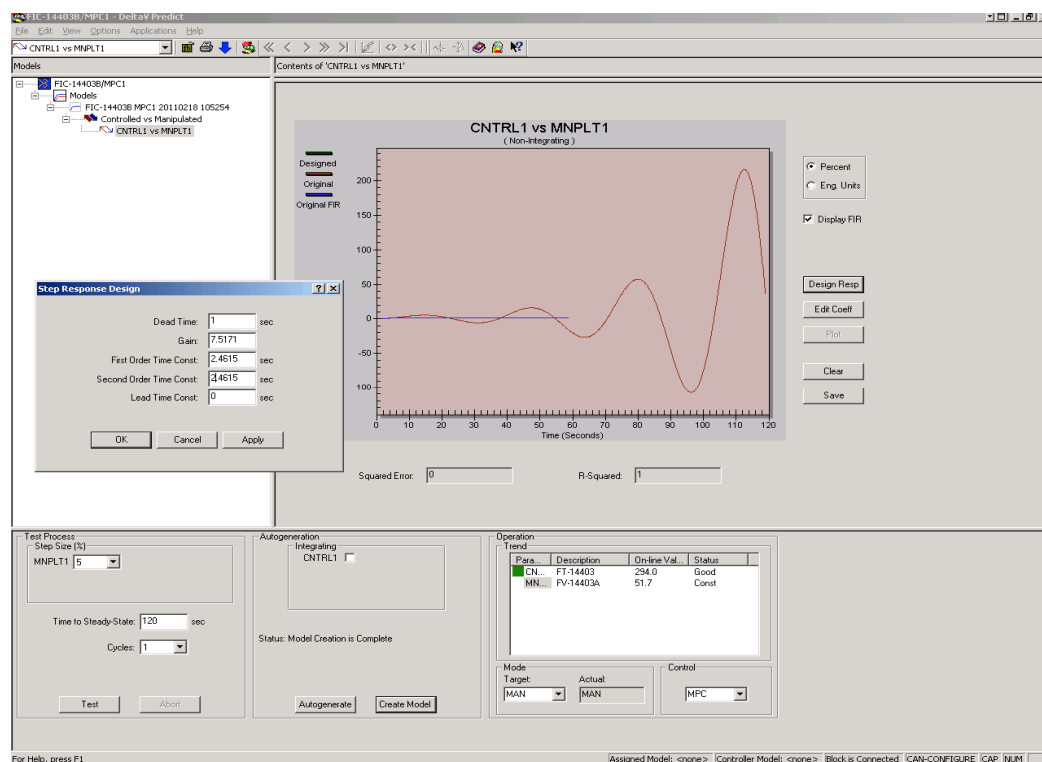


Figure 6 – Identification process of the process Mathematical Module, Gain, Dead Time, Response Time, System order characterization

It is worth noting that it is paramount to enable DeltaV Historian database after downloading the application. When enabling DeltaV Historian database, all input and output variables which will compose the process dynamics will be stored in preset time slices. History Collection database is required throughout the identification process, thus being indispensable applying the procedure aforementioned in the last paragraph.

## 6 COMPARATIVE EVALUATION OF TRANSFER FUNCTION OBTAINED THROUGH THE MPC MODULE AND ZIEGLER-NICHOLS METHOD

### 6.1 COMPARISON OF TRANSFER FUNCTION AND/OR PROCESS MATHEMATICAL MODULE

Flow loop PID controller was at first tuned with parameters obtained by the methodology developed by Ziegler & Nichols. Simulation and validation of mathematical model and/or process transfer function were accomplished through the

MatLaB computing tool. Figures 7 and 8 presents the process response curve and results of the MatlaB simulation.

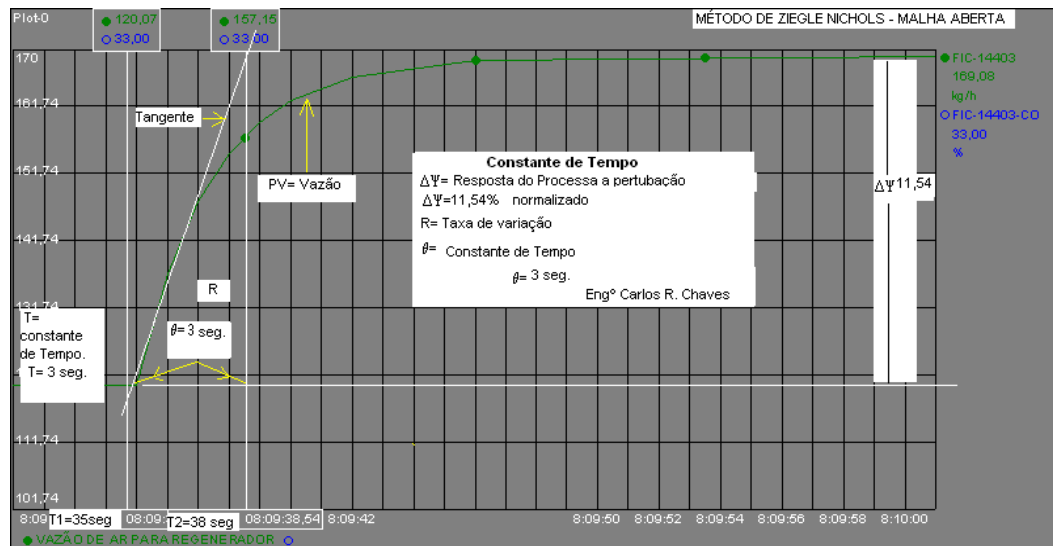


Figure 7 – Response curve for obtainment of the process transfer function, and subsequent obtainment of PID parameters

### Tuning through CHR

Method without  
overvalue, faster  
response

Transfer Function

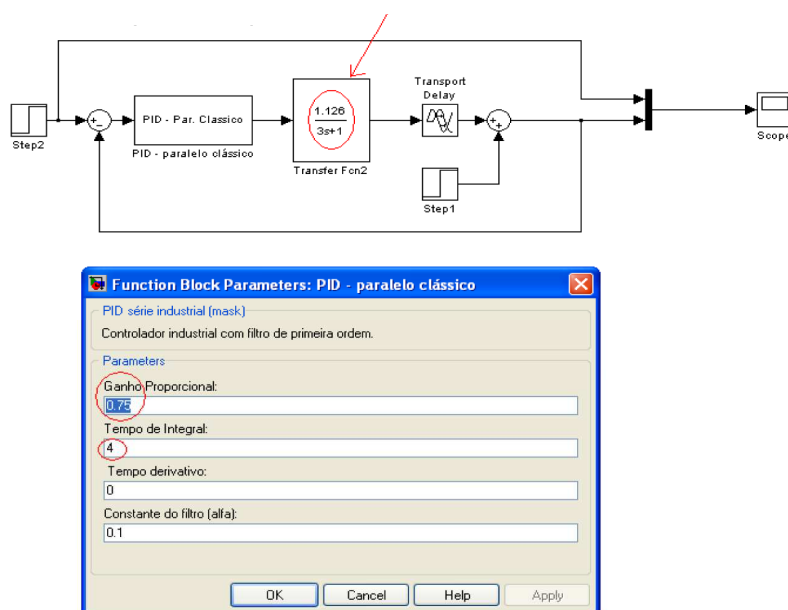


Figure 8 – Validation of Controller's PID parameters through MatLaB



Results of the Matlab simulation, using found  $K_p$  and  $T_i$  constant values, once estimated with the Ziegler-Nichols method are provided accordingly to figure 10 graph.

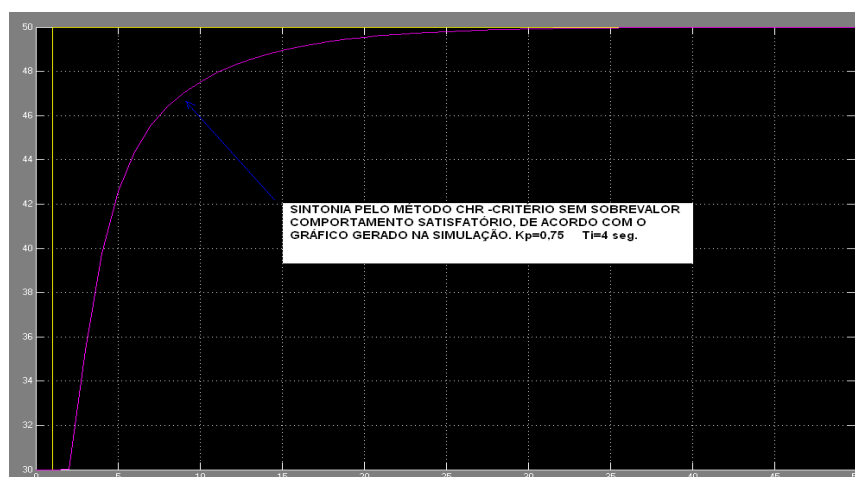


Figure 10 – Matlab Simulation result, tuning by Ziegler-Nichols method – criterion without overvalue – Simulink

After Matlab validation and setting airflow loop PID controller parameters, this loop dynamic behavior presented a good performance regarding variation aspects within unit's operational band, indicating transfer function's adherence achieved by the Ziegler-Nichols method. However it is noteworthy that after a certain unit operation time slice it was possible to observe a degradation of PID's regulatory control, as shown in figure 11.

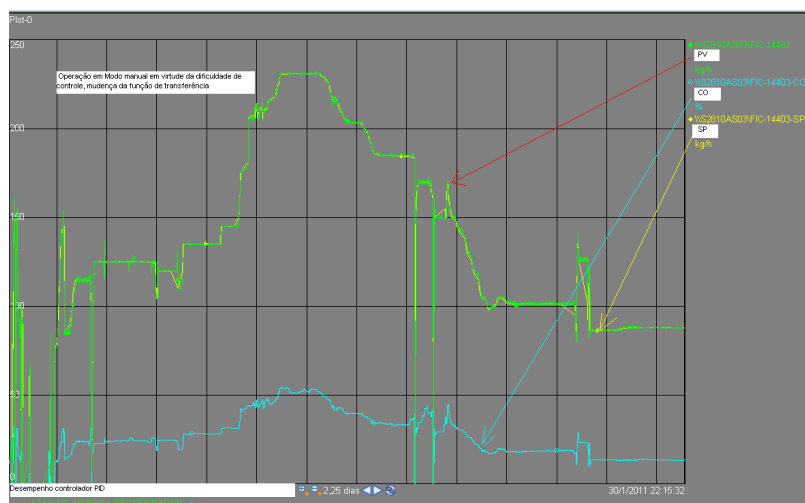


Figure 11 – Graph created after tuning of the airflow control loop

After detailed analysis of the control loop, the main contributing sources for an eventual change in the process transfer function were highlighted, such as: severe waste of control final element internal components (control valve), partial clogging of heat exchangers, circulation system of products and catalysts, etc. Therefore we may conclude that PID controller does not enable mechanisms and/or identification resources and/or discretization regarding load disturbances or changes in the mathematical model (transfer function). This is one of the reasons that make the predictive control appealing due to the possibility autocorrelation and adaptive mathematical processing (genetic algorithm).

## 6.2 TRANSFER FUNCTION OBTAINED THROUGH MCP PREDICT CONTROLLER

Evaluating data relevant to models obtained by Zeigler-Nichols and MPC Predict methods, it was noted a results approach in process time constant and delay time and/or dead time. Process gain between MPC and PID got slightly different due to conditions found regarding control final element, as highlighted in the item above. Initially we aimed at executing the test keeping pilot unit's operational conditions. However, due to load variation (type of oil), waste conditions of the control final element and noises, it would result in a relevant change in gain for the MPC.

Table 1 – Evaluation of process parameters between PID and MPC

PID Time Constant	MPC Time Constant	PID Dead Time	MPC Dead Time	PID Gain	MPC Gain
3 sec	2.46 sec	1 sec	1 sec	0.75	2.5

Throughout the evaluation period of the loop's operational performance with the transfer function identified by the MCP Predict model, stability and reduction of plant control variability in a wider area was noted. This feature of band control increase reduces the variability, typical feature of the predictive control. Nevertheless, the main object of study - the comparison of the transfer function

adherence obtained by two methods - was achieved, once values found were almost the same. It is worth noting that the explanation for a satisfactory performance for the MPC predictive controller in relation to PID disregards the identification method, as both accomplished the purpose, but the constructive format of the MCP control block. Back to the analysis of the MPC DeltaV Predict controller performance, it was noted that the process variable remained close to the set point value, and the loop variability remained within limits initially set through the MPC block setup process, regarding the prediction horizon evidencing that the model and/or transfer function found exceptionally represents the process behavior.

Figure 12 presents MPC controller behavior towards the prediction horizon, present instant represented in the green line (future represented in the left line).

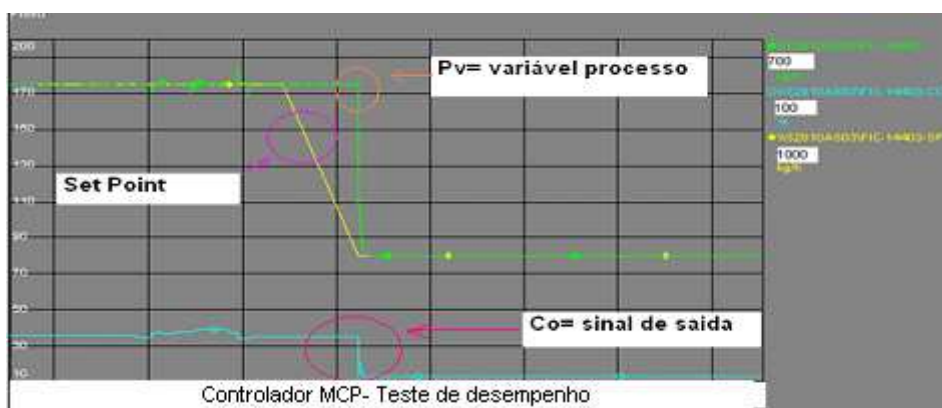


Figure 12 – Loop behavior with MCP controller

## 7 CONCLUSIONS

Based on the performance of the transfer function identification process achieved by Ziegler-Nichols method with PID controller and through MCP Predict controller, we demonstrated adherence between values obtained by different methods. Nevertheless, this study shows the fragility of the PID classic control in relation to process' mathematical model variations. This structural change in the process transfer function might occur throughout the campaign period of a plant, unit and/or system. Within this context, the predictive controller, despite being applied on a SISO loop, still offers a predictability regarding future variations, due to load and/or process terms (transfer function). Identification tools, inherent to the system,

providing agility in construction of control strategies are another appealing aspect in the implementation of predictive controls. Direct and indirect benefits are another relevant aspect regarding the strength of the process representative model, i.e., volume reduction of atmospheric emissions due to plant stability, etc. Unceasing search for energetic efficiency is the mainspring to look after understanding and identifying productive unit behaviors, therefore implementing computing endeavors with future predictability. Typically for process identification and/or transfer function of algorithms through predictive systems, the computing cost incurred is offset by optimization, increasing of productive capacity and business profitability.

## 8 ACKNOWLEDGEMENTS

We'd like to thank our fellows from Petrobras, for the opportunity and support given: engineers Luiz Carlos Casavechia, Adriano Jose Bieda Rutiquewiskie Rodrigo Gobbo, H lio Toshio Sakurai, Eloy Zeni Junior, Simon Levenhagen Lopes, Pedro Silvino, Rafael Pedroso and the Operators of SIX Research and Development Unit.

## REFERENCES

- CAMACHO, E. F.; BORDONS, C. *Model Predictive Control*. London: Springer, 1999.
- CAMPOS, M. M.; TEIXEIRA, H. *Controles típicos de equipamentos e processos industriais*. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.
- EMERSON PROCESS MANAGEMENT. *DeltaV Book's Online*. Sorocaba, 2010. Disponível em: <<http://www.emersonprocess.com.br>>. Acesso em: 4 mar. 2011.
- MORARI, M.; LEE, J. H. Model predictive control: past, present and future. *Comput. Chem. Eng.*, v. 23, p. 667-682, 1999.
- ZAMBRONE, D.; CAMACHO, E. F. Application of MPC with Multiple Objective for a Solar Refrigeration Plant. *IEEE Conference on Control Applications*, Esc cia: Glasgow, 2002.